



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

LNG 연료추진선박의 격자형 LNG 연료 탱크 적용에 관한 연구

A Study on Prismatic Pressure Vessel Type of LNG Fuel Tank
for LNG Fuelled Ship



지도교수 이강기

2017 년 2 월

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과

온누리

본 논문을 온누리의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 조 권 회 (인)

위 원 이 명 호 (인)

위 원 이 장 기 (인)

2016년 12월 15일

한국해양대학교 대학원

Contents

List of Figures.....	iii
List of Tables	v
Abstract	vi
Nomenclature	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경.....	1
1.2 연구 목적.....	2
1.3 문헌 조사.....	3
제 2 장 환경법 규제 트렌드 및 관련 기술 분석.....	9
2.1 선박 배기 오염물질.....	9
2.2 환경법 규제 트렌드 분석.....	10
2.3 환경법 규제 대응 기술.....	14
2.4 LNG 연료 추진선 산업 동향 및 전망.....	15
2.5 선종별 LNG 연료추진선 탱크 배치 분석.....	17
2.6 LNG 연료저장탱크에 대한 기술.....	22
제 3 장 LNG 연료추진 50K 벌크선의 격자형 압력탱크(LPV) 설계.....	30
3.1 연구 목적 선박의 기본 제원.....	30
3.1.1 선종 및 항로 선정 배경	30

3.1.2	메인 엔진 선정	32
3.1.3	연료탱크 타입 및 용적(Volume).....	34
3.2	격자형 압력 용기 설계.....	35
3.2.1	기술적 특성	35
3.2.2	격자형 압력 용기 설계 규정	36
3.2.3	기본 공식	38
3.2.4	탱크 설계	40
3.2.5	탱크 설계 도면	43
제 4 장	결과 및 고찰	45
4.1	실린더형 탱크와 격자형 탱크의 기술비교.....	45
4.1.1	부피 효율 및 무게중심 고찰	45
4.1.2	설계 하중(Design load).....	48
4.1.3	BOG 와 롤 오버(Roll over)	49
4.2	LNG 연료추진선의 탱크 최적배치 시 고려사항.....	53
4.3	50k LNG 연료추진 벌크선의 탱크 최적 배치.....	61
4.3.1	LNG 탱크 배치	61
4.3.2	부피 효율성과 설치 공간	64
제 5 장	결 론	68
제 6 장	참고 문헌	69

List of Figures

Figure 1-1 Annual total costs of compliance for new build general cargo vessels for different LNG-HFO proportions for 2020 (European Commission, 2015) [4] ...4	4
Figure 1-2 Annual total costs of compliance for new build container vessels for different LNG-HFO proportions for 2020 (European Commission, 2015) [4]4	4
Figure 1-3 Fuel mix for containership, bulk carrier/general cargo, tanker (crude) and tanker (product/chemical) fleet (%) (Lloyd's Register, 2014) [3]5	5
Figure 1-4 Number and the categories of ships in the SECA sub-regions 2010 by major vessel type (Source: Danish Maritime Authority/IHS Fair play) [5].....6	6
Figure 1-5 General arrangement of containership (IHI-SPB Tank) [7].....8	8
Figure 2-1 Emission control area adopted by IMO (DNV-GL, 2016) [8].....10	10
Figure 2-2 Maritime traffic on the world's oceans (Sea News, 2016) [15]13	13
Figure 2-3 Summary of forecasts on LNG-fuelled shipping fleet in the reviewed literature, number of ships (Aronietis, 2016)[17].16	16
Figure 2-4 LNG fuelled Ship operation Area updated by March 201616	16
Figure 2-5 Classification of LNG tanks by IMO22	22
Figure 2-6 Membrane tank23	23
Figure 2-7 IMO Type A independent tank24	24
Figure 2-8 IMO Type B independent tank25	25
Figure 2-9 IMO Type C independent tank26	26
Figure 2-10 Various shape of LPV tanks (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]28	28
Figure 2-11 LPV prototype tank II (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]29	29
Figure 2-12 LPV prototype tank III (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25].....29	29
Figure 3-1 Target ship selection: bulk carrier fleet by type (Clarkson Research Services, Spring 2015) [26]31	31

Figure 3-2 Example of LPV insulation (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25].....	36
Figure 3-3 Design principle of prismatic pressure vessel. (Ahn, et al) [29]	38
Figure 3-4 Intersecting methods for beam connections (Ahn, et al) [29]	38
Figure 3-5 Section configuration of X-beam(Ahn, et al) [30].	39
Figure 3-6 Equivalent stress (in MPa) because of accelerations: (a) vertical, (b) transverse, and (c) longitudinal directions. (Ahn, et al., 2016)	41
Figure 3-7 Buckling stress distribution (in MPa) based on critical loadings: (A), (B), and (C) bar. (Ahn, et al., 2016)	42
Figure 3-8 Configuration of prismatic pressure vessel (X-beam FW LPV) [29]	43
Figure 3-9 Configuration of prototype for prismatic pressure vessel (Plate FW-LPV) (unit: mm) (Ahn, at al)[30].....	43
Figure 3-10 Overall features of RW-LPV	44
Figure 4-1 Tank pressure as a function of LNG (Methane) temperature. At atmospheric pressure, an increase of temperature with 9°C raises tank pressure with only 1bar, but at the end 2°C increase has the same affect (Wartsila, 2015) [31].	50
Figure 4-2 Roll-over, variation of boil-off rate with time (SIGTTO, 2012) [33]	52
Figure 4-3 Navigation bridge visibility (TURK LOYDU, 2013) [34]	53
Figure 4-4 Gas supply system diagram	54
Figure 4-5 Minimum distance from ship side for LNG tank arrangement	62
Figure 4-6 Minimum distance from bottom shell for LNG tank arrangement	62
Figure 4-7 General arrangement of target ship (50,000 dwt Bulk Carrier)	64
Figure 4-8 Possible LNG tank location (Considering minimum distance).....	65
Figure 4-9 Case Study: overall features of FW-LPV with lowest CG (Center of Gravity)	67

List of Tables

Table 1-1 Comparison between IHI-SPB and type-C tanks (NAGATA, et al., 2015) [7] ...	7
Table 1-2 The principal particulars and specification of containership (IHI-SPB Tank) (NAGATA, et al., 2015) [7]	8
Table 2-1 China emission control area (Class NK, 2015) [9].....	11
Table 2-2 China emission control area	12
Table 2-3 NO _x and SO _x regulation (DNV-GL)	13
Table 2-4 LNG fueled ship reference and tank arrangement.....	17
Table 2-5 Type of LPV (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]	27
Table 2-6 LPV proto-type tank list (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]	28
Table 3-1 Principle particulars of target ship (general)	32
Table 3-2 Comparison between ME-GI and X-DF [27]	33
Table 3-3 Principle particulars of target ship (main engine)	34
Table 3-4 Principle particulars of target ship (Tank Capacity).....	35
Table 3-5 Research list for IGC code approval of LPV (CHANG, 2015) [28]	37
Table 4-1 Type C tank volume comparison by head type	46
Table 4-2 Fit wall LPV tank volume (W=H=D).....	46
Table 4-3 Comparison of the effect to center of gravity	48
Table 4-4 Convection Current in LNG Tank (SIGTTO, 2012) [33].....	51
Table 4-5 Definition of hazardous area zone	58
Table 4-6 Minimum distance from shell plating or aft terminal for LNG tank arrangement	62
Table 4-7 Comparison of space efficiency between cylinder and prismatic type Tanks	66

A Study on Prismatic Pressure Vessel Type of LNG Fuel Tank For LNG Fuelled Ship

Nuri ON

Department of Offshore Plant Management

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

This study focuses on the necessity and the feasibility of LNG fuelled ships by analyzing industrial trends driven by environmental regulations on air-polluting exhausts from marine engines. Design and arrangement of an LNG fuel tank is critical to build LNG fuelled ships since an LNG fuel tank is more voluminous and costly than the case of the corresponding HFO tank. Furthermore, designing the tank to meet safety regulations required by IGF Code is difficult and sometimes requires development of new shape of a ship, resulting in a negative impact on cargo spaces. Recently, about 85 ships are using LNG as fuel, and most of them have adopted “Type C Independent Tank – Cylindrical Type”. It is difficult to make a proper arrangement in installing this type of tank. Hence, it might be a major challenge when the size of the tank should be increased significantly for long distance voyage. Compared with other ships, tankers have enough deck space to arrange an LNG fuel tank on. For container ships, however, position of the tank highly affects cargo capacity as cargoes are stored on deck and inside hull. Bulk carriers are faced with the same problem as container ships are due to their hatch covers and deck facilities. Bulk carriers account for the largest share of total ships in number. It is estimated that 20~30% of small and mid-scale bulk carriers will use LNG as fuel. Until now, no bulk carriers have adopted LNG as fuel. Only two cement carriers are sailing on LNG though these are special purpose vessels with special ship shape.

Therefore, on the premise that cargo loss caused by the LNG fuel tank should be minimized, this thesis studies the stability and optimal arrangement of LNG fuel tank by comparing and analyzing between a cylindrical pressure tank and a prismatic pressure tank (called the “Lattice Pressure Vessel”) on the basis of standard design of a 50k bulk carrier.

KEY WORDS: LNG Fuelled Ship LNG 연료추진선, LNG Tank LNG탱크, IMO Type C Independent Tank IMO 타입 C 독립형 탱크, Prismatic Pressure Vessel 격자형 압력용기, LNG Fuel Tank Arrangement LNG연료탱크배치, IGF Code IGF코드



Nomenclature

<i>ACH</i>	Air Change per Hour
<i>AIP</i>	Approval in Principle
<i>BC</i>	Black Carbon
<i>BOG</i>	Boil-off Gas
<i>BOR</i>	Boil-off Rate
<i>CAPEX</i>	Capital Expenditure
<i>CO₂</i>	Carbon Dioxide
<i>ECA</i>	Emission Control Area
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation
<i>EEDI</i>	Energy Efficiency Design Index
<i>EEOI</i>	Energy Efficiency Operational Indicator
<i>FEA</i>	Finite-Element Analysis
<i>FW-LPV</i>	Fit Wall-Lattice Pressure Vessel
<i>GIIGNL</i>	International Group of Liquefied Natural Gas Importers
<i>HFO</i>	Heavy Fuel Oil
<i>IGF code</i>	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels
<i>IGG</i>	Inert Gas Generator
<i>IMDG Code</i>	International Maritime Dangerous Goods Code
<i>IMO</i>	International Maritime Organization

<i>LCV</i>	Lower Calorific Value
<i>LNG</i>	Liquefied Natural Gas
<i>MARVs</i>	Maximum Allowable Relief Valve Setting
<i>MEPC</i>	Marine Environment Protection Committee
<i>MDO</i>	Marine Diesel Oil
<i>MGO</i>	Marine Gas Oil
<i>MSC</i>	Maritime Safety Committee
<i>NBOG</i>	Natural Boil-Off Gas
<i>NCR</i>	Normal Continuous Rating
<i>NO_x</i>	Oxides of Nitrogen
<i>OPEX</i>	Operating Expenditure
<i>PM</i>	Particulate Matter
<i>PSV</i>	Platform Supply Vessel
<i>RC-LPV</i>	Round Corner-Lattice Pressure Vessel
<i>RW-LPV</i>	Round Wall-Lattice Pressure Vessel
<i>SCR</i>	Selective Catalytic Reduction
<i>SFOC</i>	Specific Fuel Oil Consumption
<i>SOLAS</i>	International Convention for the Safety of Life at Sea
<i>SO_x</i>	Sulfur Oxides
<i>STCW</i>	International Convention on Standards of Training, Certification and Watch keeping for Seafarers
<i>TDC</i>	Top Dead Center

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

해상 수송의 경제성을 높이기 위해 선박은 대형화 되어 왔으며, 이에 따라 선박 기관도 고출력화 및 대형화 되었다. 연료비 절감을 위하여, 기관의 효율을 높이기 위한 노력은 계속 되어왔으며 그 결과 연소 환경은 더욱 고온 고압이 되어 해양 대기오염을 유발하는 유해배기가스 배출량은 증가하였다. 선박 유해배기가스를 이루는 오염물질로는 질소산화물(Oxides of Nitrogen, NO_x), 황산화물(Sulfur Oxides, SO_x), 미립자(Particulate Matter, PM), 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO₂) 등이 있으며 이를 줄이기 위한 방안으로 환경규제법규를 강화하는 것이 국제적 추세이다.

강화된 환경법을 만족시키기 위해 청정연료인 LNG (Liquefied Natural Gas)를 비롯한 가스연료(Gaseous Fuel)를 사용하는 선박이 증가하고 있다. 이에 따라 IMO는 SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea) 및 STCW (International Convention on Standards of Training, Certification and Watch keeping for Seafarers)에 가스 추진선에 대한 규정을 추가하였으며 지난 2015년 6월 해사안전위원회(Maritime Safety Committee, MSC) 95차 회의에서 가스연료를 사용하는 선박에 적용되는 IGF code를 채택 하였다. 이는 2017년 1월부터 발효된다 (Lloyd's Register, 2016)[1].

LNG 운반선의 LNG 화물탱크와 LNG 연료추진선의 LNG 연료 탱크는 극저온에 대한 대책이 필요하고 롤오버(Rollover), 슬로싱(Sloshing) 등에 대한 안전성을 고려해야 한다는 점에서 공통점을 갖는다. 하지만 LNG 자체가 화물인 LNG 운반선과 달리, LNG 연료추진선의 경우에는 연료(LNG)탱크의

크기가 증가해서 재화용적 손실(Cargo Loss)이 발생할 수 있다. 따라서 선박의 화물용적(Cargo Capacity)을 기존과 같이 유지하며 선박 복원안정성을 확보하기 위해서는 적절한 LNG 연료 탱크 타입의 선정과 최적배치 방안을 고려하여야 한다.

1.2 연구목적

해양 대기오염 규제로 인한 산업 트렌드를 분석하고, LNG 연료추진선의 필요성과 타당성을 제시한다. LNG 연료 추진선을 설계 및 건조함에 있어 LNG 연료탱크의 최적화는 핵심 기술 사항이다. LNG 연료탱크는 기존의 HFO (Heavy Fuel Oil)탱크에 비하여 용적이 증가하고, IGF Code (International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels)에서 요구하는 안전에 관한 규제를 만족 해야 하기 때문에 설계가 까다롭다. LNG 연료탱크의 크기는 화물 선적 용량에 부정적인 영향을 미치기 때문에 선박의 안전성과 경제성 확보를 위해 선박설계단계에서 반드시 해결해야 할 문제이다.

LNG 연료추진선은 현재 85척 정도가 운항 중이며 [2], 약 200척이 건조 중이다. 연료탱크는 “타입 C 독립형 탱크-실린더형”을 주로 채택하였다. 실린더형 연료탱크는 설치 공간이 많이 필요하기 때문에 장거리 항해를 위해 요구 연료량이 증가할 경우 탱크 배치 시 공간 부족문제가 크게 부각된다

탱커선의 경우 상갑판에 화물탱크와 연결된 파이프 구조물 외에는 빈 공간이 많으므로 상갑판에 LNG 탱크를 배치하면 화물용적(Cargo Capacity)에는 영향을 주지 않는다. 이와는 다르게 선체 내부 및 갑판에도 화물을 싣는 컨테이너선의 경우는 탱크의 위치가 화물용적에 크게 영향을 미친다. 또한 상갑판의 대부분이 해치커버로 덮여있고 선체내부는 화물탱크로 구성된 벌크선 역시 LNG 연료탱크의 위치가 화물적재용적에 심각한 영향을 줄 수 있다

벌크선은 가장 혼한 선종이며, 환경규제를 만족 하기 위해 2030년까지

20%~30%의 중소형 벌크선이 LNG연료를 사용할 것으로 예측된다[3].

본 논문에서는 50k 벌크선의 표준설계를 활용하여, LNG 연료탱크 배치로 인한 재화용적 손실(Cargo Loss)을 허용하지 않도록 “격자형 압력탱크(Lattice Pressure Vessel)”를 설계하고, “실린더형 압력탱크”와 “격자형 압력탱크” 각각의 특성을 분석하여 “격자형 압력탱크” 탱크 자체의 안정성 검토 및 최적 탱크배치 방법을 제시한다.

1.3 문헌 조사

LNG 연료추진선의 LNG 연료 탱크 타입이나 배치에 관한 학술적인 연구 문헌은 거의 없으며 유관단체들의 보고서나 실적선에 근거한 자료가 대부분이다. 본 논문에서는 LNG 연료추진선 시장의 동향 및 예측에 관한 문헌을 검토하여 연구의 타당성을 확보하였으며, LNG 연료 탱크에 관한 기술자료를 중심으로 문헌조사를 실시하였다.

유럽연합 집행위원회(European Commission)에서 2015년 12월 발표한 “Study on the Completion of an EU Framework on LNG-Fuelled Ships and Its Relevant Fuel Provision Infrastructure” 보고서에 의하면, 황 함유량이 0.1% 미만인 MDO를 사용했을 경우와 HFO를 사용하며 스크러버(Scrubber)를 설치한 경우, LNG를 연료로 사용한 경우를 비교하였을 때 일반화물선종(General Cargo Ship)은 **Figure 1-1**과 같이 LNG가격이 HFO에 비하여 10%이상 저렴할 때부터 LNG 연료추진선박이 경제성이 있었으며, 컨테이너선종은 **Figure 1-2**과 같이 LNG가격이 HFO에 비하여 20%이상 저렴할 때부터 LNG 연료추진선박의 경제성이 더 나왔다(European Commission, 2015) [4].

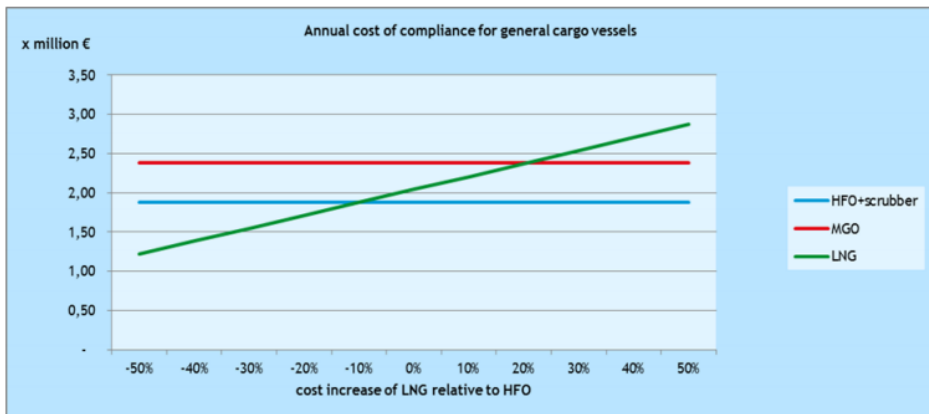


Figure 1-1 Annual total costs of compliance for new build general cargo vessels for different LNG-HFO proportions for 2020 (European Commission, 2015) [4]

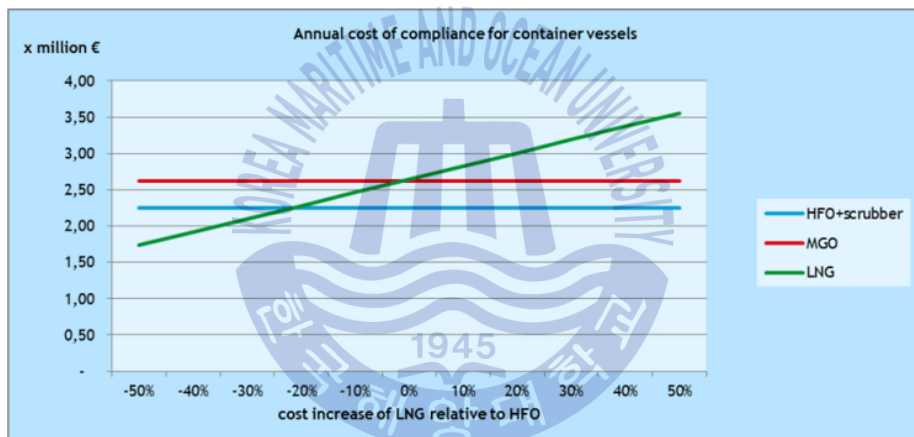


Figure 1-2 Annual total costs of compliance for new build container vessels for different LNG-HFO proportions for 2020 (European Commission, 2015) [4]

덴마크 정부 해사기구(Danish Maritime Authority)의 “A Feasibility Study for an LNG Filling Station Infrastructure and Test of Recommendations” 연구보고서에 따르면, 덴마크 정부 해사기구는 LNG연료추진선을 적용하는 것이 MGO를 사용하는 것보다 짧은 투자회수(Pay-Back) 효과를 보는 합리적인 전략이라고 판단하였으며, HFO대비 LNG 가격이 경제성을 판단하는 핵심기준임을 밝혔다 (Danish Maritime Authority, 2012) [5].

로이드 선급의 “Global Marine Fuel Trend 2030” 보고서에 의하면, **Figure 1-3**과 같이 2030년에 케미컬탱커선/제품유운반선 중 LNG를 연료로 사용하는 선박은 약 30%로 전 선종에서 가장 높은 적용 비율을 보일 것으로 예측된다. 그 이유는 케미컬탱커선/제품유운반선 특성상 소형선이 많이 존재하는데, 소형선일수록 엔진이 초기투자비에 미치는 영향이 크고 재화중량톤(DWT)에 영향을 받는 LNG 탱크 용량을 적절히 산정할 수 있기 때문이다. 또한 소형 선박은 대형 선박에 비해서 높은 kW · h/t · nm을 가진다. 이러한 요인으로 인해 컨테이너선은 탱커선이나 벌크선에 비해서 적은 비율의 선박이 LNG연료화 될 것으로 예측된다. 컨테이너선의 경우 선령이 비교적 적은 선박이 많으며 새로이 건조되는 선박이 적고 그마저 대형선을 건조하는 추세이다[3]. 이러한 예측은 수행기관에 따라 그 결과가 서로 상충하기도 한다.

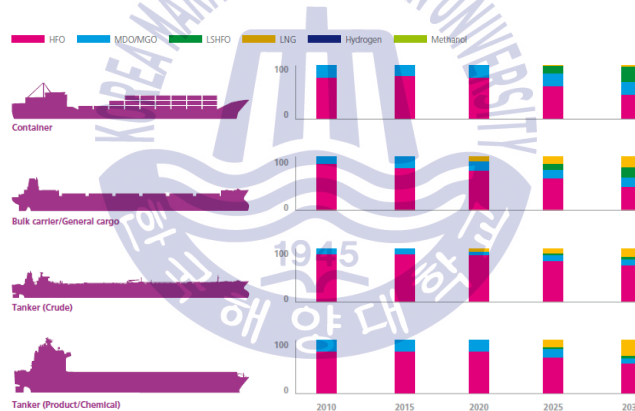


Figure 1-3 Fuel mix for containership, bulk carrier/general cargo, tanker (crude) and tanker (product/chemical) fleet (%) (Lloyd's Register, 2014) [3]

덴마크 정부 해사기구의 연구보고서[5]에 따르면, 2010년에 SECA 지역을 항해하는 선박 수는 총 14,014척으로 **Figure 1-4**에서 보듯이 예인선, 일반 화물선(General Cargo Ship)이 수적으로 가장 많고, 재화중량톤으로는 로로선(Ro-Ro), 탱커선, 벌크선이 많다 (Danish Maritime Authority, 2012) [5].

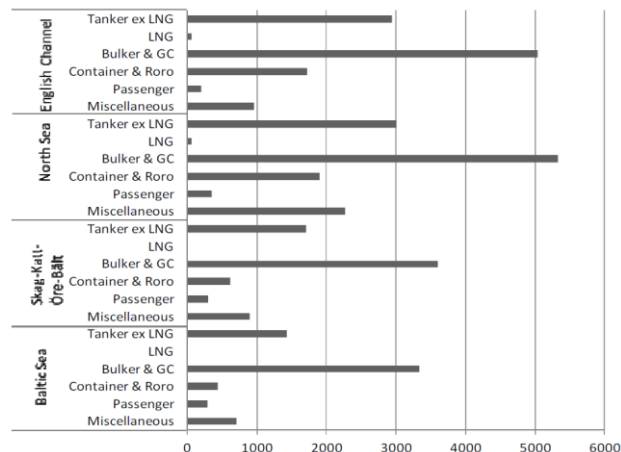


Figure 1-4 Number and the categories of ships in the SECA sub-regions 2010 by major vessel type (Source: Danish Maritime Authority/IHS Fair play) [5].

ABS선급에서 발표한 “Design and Certification of Type C Independent Tanks for Gas Fuelled Ships” 논문에 따르면, 1000 m³ 이하의 LNG 탱크의 장단점을 비교하였을 때, 타입 C 독립형탱크가 안전하고 견고하며 경제적으로도 우수하여 가스추진선(Gas Fuelled Ship)의 연료탱크로써 적합하다고 밝혔다 (ABS Houston, TX, 2013) [6].

IHI Engineering의 “IHI-SPB Tank for LNG-Fueled Ship IHI Type Tank” 논문에 의하면, IHI-SPB 탱크는 선체형상을 따라 최대의 용적효율을 가지도록 자유로운 탱크 형상 설계가 가능하고 슬로싱에 강하여 LNG 연료탱크로 적합하다. 현존하는 LNG연료 추진선에 주로 적용된 “타입C 독립형탱크-실린더형”과 “IHI-SPB Type B Tank”를 비교하면 **Table 1-1**과 같다. 2,000 m³ IHI-SPB Type B 탱크는 타입 C 독립형 탱크에 비해서 약 1/5에서 1/6정도 무게가 가벼웠으며, 재질을 스테인리스(Stainless)나 9% 니켈 강을 적용했을 경우에는 약 1/3이 감소하였다 (NAGATA, et al., 2015) [7].

Table 1-1 Comparison between IHI-SPB and type-C tanks (NAGATA, et al., 2015) [7]

Feature	IHI-SPB Tank	Type-C tank
Tank Shape	Square (arbitrary shape)	Cylindrical
Rated Tank Pressure	<0.7 bar (0.07 MPa)	<10 bar (1 MPa)
Tank Material	Aluminum alloy (Stainless steel, 9% nickel steel)	Stainless Steel (9% nickel steel)
Tank Weight	Light	Heavy
Insulation	Expanded foam	Vacuum Insulation, Expanded foam
Space Efficiency	Good	Bad
Tank Capacity	Unlimited	Limited

IHI Engineering의 논문[7]에 의하면, LNG를 연료로 사용하는 10,000 TEU 컨테이너 선에 “Type B IHI-SPB Tank”를 적용했을 경우의 사양 및 일반배치도(General arrangement, G/A)는 **Table 1-2, Figure 1-5**과 같다. 대상선박은 ECA 지역을 항해한다고 가정 하였으며, LNG 탱크 용량을 최소화하기 위해서, 평소 항해 시에는 HFO를 사용하고 ECA지역에서만 LNG로 전환한다고 가정하여 설계하였다. HFO로 항해 시에 발생하는 자연 기화 가스(Natural Boil-off Gas, NBOG)는 발전기의 연료로 사용한다고 가정하였다. LNG연료탱크 및 컴프레서룸(Compressor Room)은 거주구역 아래에 설치하여 컨테이너 화물용적에 대한 영향을 최소화하였지만 결과적으로는 200 TEU의 화물용적(Cargo capacity) 손실이 있었다.

Table 1-2 The principal particulars and specification of containership (IHI-SPB Tank) (NAGATA, et al., 2015) [7]

Total length		Approx. 330.0 m
Total Width		Approx. 48.0 m
Depth		Approx. 27.0 m
Container loading capacity		10,000 TEU
Route		Far East to Europe
Range		Approx. 20,000 miles
Tank Capacity	LNG	Approx. 2,000 m ³ (inside ECA)
	Heavy Fuel Oil	Approx. 10,000 m ³ (outside ECA)
LNG Tank Arrangement		Under accommodation area
Compressor room arrangement		Under accommodation area

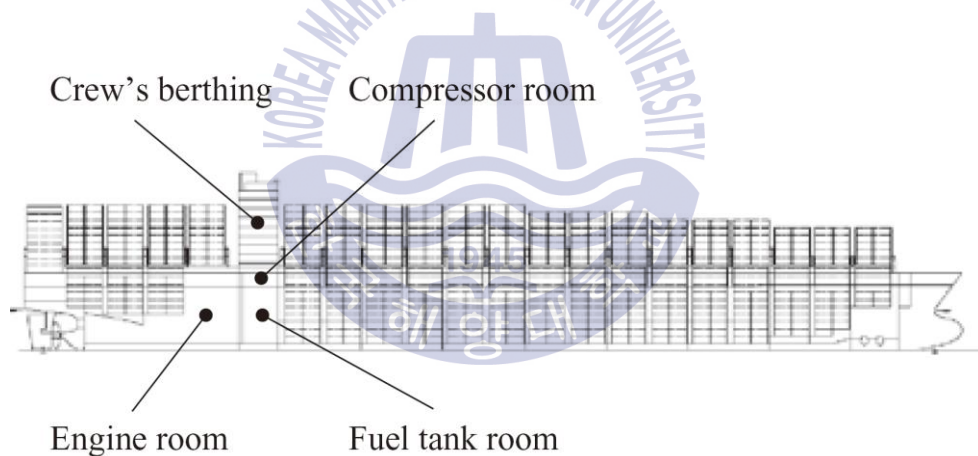


Figure 1-5 General arrangement of containership (IHI-SPB Tank) (NAGATA, et al., 2015) [7]

제 2 장 환경법 규제 트렌드 및 관련 기술 분석

2.1 선박 배기 오염물질

선박 유해배기가스의 주요 오염물질은 질소산화물(Oxides of Nitrogen, NO_x), 황산화물(Sulfur Oxides, SO_x), 미립자(Particulate Matter, PM), 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO_2) 이다. NO_x 는 고온 고압의 연소 환경에서 생성되는 무색무취의 가스이며 오존층을 파괴하고, 대기 중의 수분과 화합하여 산성비를 유발하는 등 화학 작용을 통해 주로 인체 호흡기에 간접적인 해를 끼친다. 미립자는 인체의 폐로 흡입되어 염증을 유발하며, 산소의 원활한 흡수를 방해한다. SO_x 는 원유에 포함된 황 성분이 연소될 때 생성되며 자체적으로도 독성분을 가진 화학조성이다. 더욱이 선박배기가스 배출과정에서 SO_x 는 추가적인 PM의 발생을 유발하여 호흡기에 직접적인 영향을 준다. 간접적으로는 산성비의 원인이 된다.

대기오염물질의 위해도에 따라 범 지구적인 규제에 병행하여 국지적 규제도 이루어진다. CO_2 나 블랙카본(Black Carbon, BC)은 해수면 상승이나, 이상기후 현상을 유발하는 등 장기간에 걸쳐 범세계적으로 부정적 영향을 끼치는 대기오염인자이다. 선박으로 인한 CO_2 감축을 위해서 에너지 효율 설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI) 및 에너지 효율 운항 지표(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI) 등을 통해 규제를 강화하였다. 반면에, NO_x , PM, SO_x 의 영향은 단기간에 나타나며, 지역에 국한 되는 특징을 가진다. 주요 국가는 NO_x , PM, SO_x 로 인한 항만 지역의 피해를 인식하고, 자국 해역을 항행하는 선박의 배기가스를 규제하기 시작했다.

2.2 환경법 규제 트렌드 분석

세계해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 1990년대부터 발틱해, 북해, 북아메리카 지역의 특정 해역을 배출규제해역(Emission Control Area, ECA)로 지정하였으며 이를 도식화하면 **Figure 2-1**과 같다. 더불어 유럽이나 미국 중심으로 유럽연합지침(EU Directive) 및 미국환경보호국(US Environmental Protection Agency, EPA), 미국 캘리포니아 대기환경청규정(CARB Regulation) 등의 지역 법을 통해 선박의 유해배기가스를 규제해왔다.

2016년 10월 24일부터 28일까지 개최된 IMO 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC) 70차 회의에서는 기존의 SO_x규제만 실시 했던 발틱해 및 북해 지역에 NO_x규제를 추가 실시하기로 합의하였다. 이 규제는 2021년 1월 1일부터 발효될 예정이며 2021년 1월이후로 신조 되는 선박에 국한되어 적용된다. 또한 MEPC 70차 회의에서는 환경규제를 충족하기 위한 저유황유의 수급문제를 고려하여, 2020년부터 전세계 해역에 0.5% 황산화물 규제를 시행할 것임을 공표하였다.

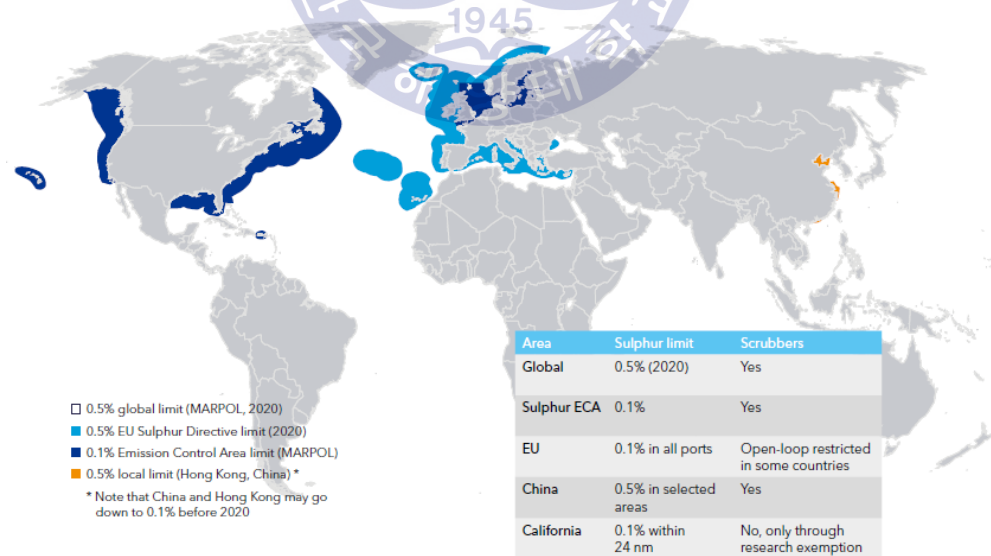


Figure 2-1 Emission control area adopted by IMO (DNV-GL, 2016) [8]

기존의 유럽과 미국을 중심으로 이뤄졌던 항만 대기오염에 대한 인식과 규제가 아시아까지 확대되었다. 홍콩이 2015년 7월부터 홍콩항의 대기 배출물 규제를 시행하였고, 중국의 경우도 **Table 2-1**과 같이 2015년 12월 자체적으로 상해, 광저우, 텐진 등의 주요항만이 포함된 영해를 ECA로 선포하였다. **Table 2-2**에 정리되어 있듯이, 2016년에는 항만의 여건에 맞추어 자율적으로 적용하며, 2017년 1월부터는 ECA내 11개 핵심항구에 정박하는 모든 선박은 황 함유량 0.5% 이하의 연료유 만을 사용해야 한다. 2018년에는 ECA내에 존재하는 모든 항만에 정박하는 선박에 대해 규제가 적용되며, 2019년에는 ECA 해역을 항해하는 모든 선박을 대상으로 규제가 적용된다. 또한 2019년에 황 함유량 규제를 0.1%까지 낮추는 것을 검토 후 시행 예정이다.

Table 2-1 China emission control area (Class NK, 2015) [9]


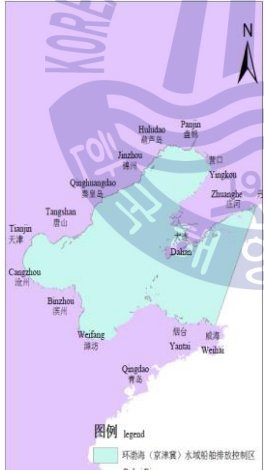
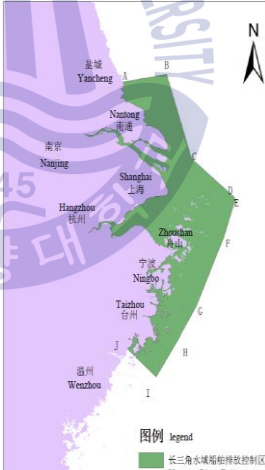
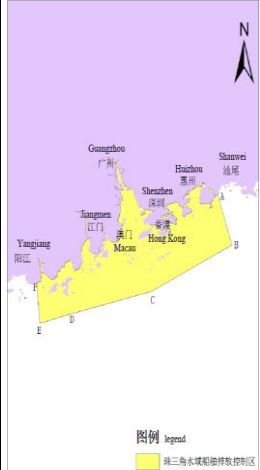
			
<p>China Emission Control Area Overview (DNV-GL, 2016) [36]</p>	<p>The Bohai Rim emission control area</p>	<p>The Yangtze Delta emission control area</p>	<p>Pearl River Delta emission control area</p>

Table 2-2 China emission control area

	The Regulation Area	The ships regulated
Starting on 1 January 2016	The ports issued official notification separately	Berthing at port*
Starting on 1 January 2017	Core Ports** in ECA	Berthing at port*
Starting on 1 January 2018	Any Ports in ECA	Berthing at port*
Starting on 1 January 2019	Any Ports in ECA	Entering ECA

* Except for 1 hour after arrival and the last 1 hour prior to departure

** Core Ports :

4Ports in Bohai Rim (Tianjin, Qinhuangdao, Tangshaun and Huanghua)

4Ports in Yangtze River Delta (Shanghai, Ningbo-Zhoushan, Suzhou, Nantong)

3Ports in Pearl River Delta (Shenzhen, Guangzhou, Zhuhai)

주요 교역국의 ECA 규제를 만족하기 위해서는 친환경 선박을 신조하거나 개조하는 등의 대안이 요구되며 이는 조선 및 해운산업에 큰 영향을 끼친다. 중국 항만은 전세계 컨테이너 물량의 20% 이상을 담당한다. 2015년 기준 한-중 항로에 총 29개사 71척의 컨테이너선이 투입되었으며(김수엽 등, 2015)[10], 이들 선박들은 2016년 이후 발효된 중국의 0.5% 황산화물 규제를 만족하기 위한 대안을 강구해야 한다. **Figure 2-2**에서 보여진 바와 같이 해상 교통량이 많은 지역들을 중심으로 ECA로 지정될 예정이다. 싱가포르를 비롯한 호주, 일본, 지중해 지역이 ECA 지정을 검토하고 있다 [11, 12]. 석탄 수입량 중 42%의 석탄을 호주로부터 수입하는 한국으로서는 호주의 ECA 지정 여부에도 주목 해야 한다[13].

2016년 10월 IMO MEPC 70차 회의에서 2020년부터 전세계 해역에 0.5% 황산화물 규제가 적용될 것임을 발표하였다. 경제협력개발기구(Organization

for Economic Cooperation and Development, OECD)는 이 규제로 인해 해운업이 선종 및 크기에 따라 20%에서 최대 85%까지 증가할 것이라고 예측하였다. 선주들은 **Table 2-3**과 같이 요약되는 환경규제를 충족하기 위해 경제적인 대안을 강구 해야 한다[14].

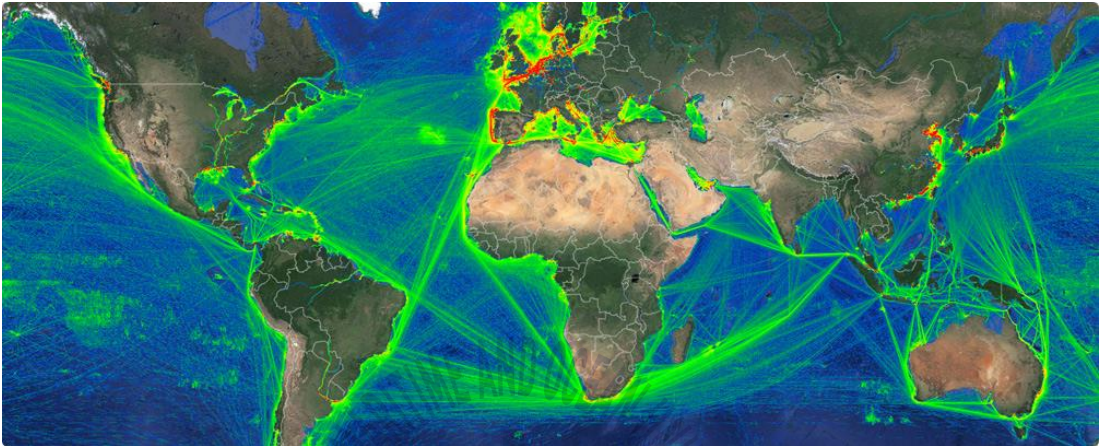
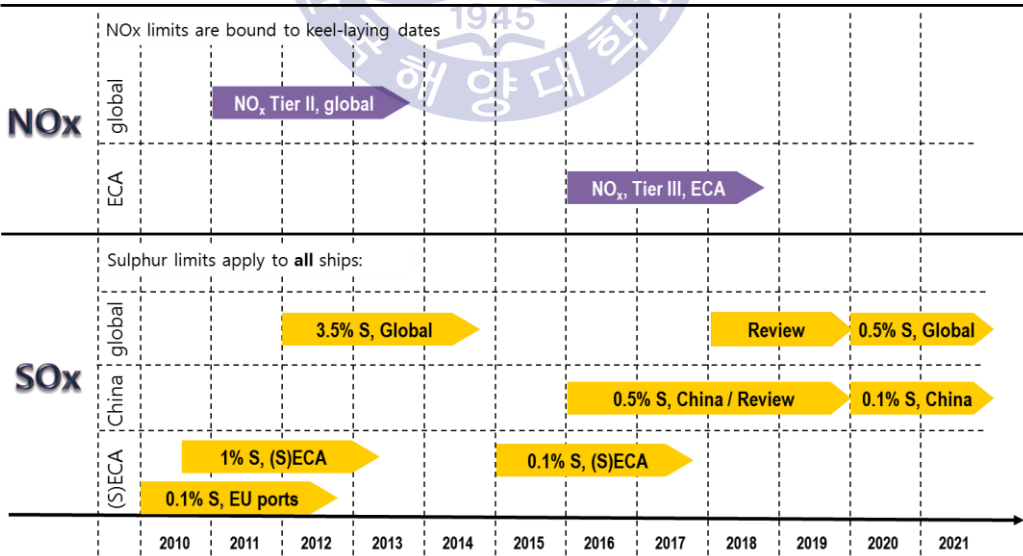


Figure 2-2 Maritime traffic on the world’s oceans [15]

Table 2-3 NO_x and SO_x regulation (DNV-GL)



2.3 환경법 규제 대응 기술

선박 유해배기가스에 대한 규제를 만족하기 위해서는 다음과 같은 3가지 대안이 있다.

첫 번째는 황 함유량이 적은 저유황유를 사용하는 것이다. ECA지역에서 요구하는 황 함유량을 가진 저유황유를 사용함으로써 SO_x 규제를 만족하고 PM 수치를 감소시킬 수 있다. 저유황유의 NO_x 나 CO_2 의 발생량은 기존의 HFO를 사용했을 때와 유사하게 배출되며, NO_x Tier III 규제를 만족시키기 위해서는 추가로 선택적 환원촉매장치 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 또는 배기가스 재순환 장치(Exhaust Gas Recirculation, EGR) 등의 설비를 장착하여야 한다. 저유황유를 사용할 경우에는 기존 엔진을 사용할 수 있으며, 연료 저장설비 증축이 불필요하여 초기투자비(Capital Expenditure, CAPEX)를 줄일 수 있다. 반면에 저유황유의 가격이 매우 높으며, 제한된 정유시설로 인하여 추가적인 가격 인상이 있을 경우 높은 운영비용(Operating Expenditure, OPEX)이 예상된다. 또한 MGO와 같은 증류유(Distillate Fuel)의 경우에는, 낮은 점성으로 인해 운용상의 애로사항이 발생할 것을 대비해야 한다[5].

두 번째는 배기가스의 후 처리를 통해 유해 인자를 제거하는 방법이다. 배기관의 끝 단에 스크러버(Scrubber)를 설치하여 SO_x 및 PM을 제거하고, 별도로 SCR장치 또는 EGR 장치를 설치하여 NO_x 를 제거한다. 스크러버로 황산화물을 제거하기 때문에 MGO(Marine Gas Oil)나 LNG에 비해서 범용성이 높고 경제적인 HFO를 사용할 수 있는 장점이 있다. 하지만, CO_2 의 감소효과는 적고, 작동 중 발생하는 폐기물 처리에 대한 대책이 요구된다. 스크러버는 IMO 증서를 발급받아야 하며, 넓은 설치공간을 차지하기 때문에 경우에 따라 선박의 화물용적(Cargo Capacity)에 영향을 줄 수 있다. 초기투자비용 증가가 예상되며, 약 3%-5% 정도 연료 소비율이 증가한다[8].

세 번째로는 LNG를 연료로 사용하는 것이다. LNG자체에 황 함유량이 적기 때문에 SO_x 및 PM 발생량이 무시할 수 있을 정도로 감소한다. 또한 LNG는

HFO에 비하여 적은 양의 탄소를 구성되어있기 때문에 25%까지 CO₂의 감소효과도 있다. NO_x의 경우 오토사이클(Otto Cycle)을 사용하는 엔진 적용 시 별도의 추가설비 없이 Tier III 기준을 만족하도록 NO_x 발생량을 80~90% 감소 시킬 수 있으나, 메탄 슬립(Methane Slip)이 발생하여 이산화탄소보다 온실 효과가 강력한 메탄(CH₄)이 누설된다. 디젤사이클(Diesel Cycle)을 사용하는 엔진 적용 시에는 메탄 슬립이 발생하지 않으나, 자체적으로는 NO_x량이 20%이하로 비교적 적게 감소하여 별도의 EGR 혹은 SCR을 장착하여야 IMO Tier III규정을 만족시킬 수 있다[8]. LNG를 연료로 사용하는 엔진의 효과는 실적선 운항을 통해 이미 증명되었으며 LNG와 HFO 혹은 MDO를 필요에 따라 교체하며 사용할 수 있는 이중연료(Dual Fuel) 엔진도 상용화되었다.

2.4 LNG연료 추진선 산업 동향 및 전망

LNG 추진선은 향후 대규모 시장을 형성할 것으로 기대된다. 로이드 선급은 **Figure 2-3**과 같이 2025년까지 최대 약 1,963척의 LNG 추진선이 건조될 것이라고 예측하였다[16]. DNV-GL에 의하면 2016년 10월 기준으로 86척의 LNG추진선이 항해 중이며, 93척이 오더북(Order Book)에 존재한다. 이는 LNG 운반선과 내륙수로를 항해하는 선박(Inland Waterway Vessel)은 포함되지 않은 통계로 LNG를 연료로 사용하는 LNG 운반선까지 포함하면 더 많은 LNG 연료추진선박이 존재하며 2012년에 수행한 예측결과 보다 빠른 속도로 LNG 추진선이 증가하고 있다.

중국의 경우 “Wuhan Rules & Research Institute, CCS 2015”의 보고에 따르면 2010년 Wutuo 302호 페리선을 LNG연료추진선으로 개조하였고, 2012년에 Pilot Project로 LNG 추진선을 진수하였다. 중국 정부는 2015년에 개시된 “제13차 5개년 계획”에 따라 내륙수로를 항해하는 선박에 대해 LNG연료추진 보급확대정책을 펴고 있는데 약 25,700척에 이르는 선박이 그 대상이다. 이미 2척의 LNG 병커링 선박이 건조되었으며 수 백 척의 자항 바지선을 CNG

연료추진으로 개조하는 작업에 들어간 것으로 보고되고 있다.

LNG 추진선 시장이 커지기 위해서는 LNG 추진 선박 기술뿐만 아니라, 연료인 LNG의 범용성과 경제성 확보가 우선되어야 한다. 유럽중심으로 전세계 10개 내외로 존재하던 LNG 병커링 터미널(Bunkering Terminal)이 북아메리카의 ECA 해역 및 아시아주요 항만까지 빠르게 확충되고 있으며 **Figure 2-4**에서 확인할 수 있듯이 LNG 연료추진선 향해 해역 또한 넓어지고 있다. 2016년 8월 유럽의 로테르담 항만이 병커링 서비스를 시작했으며 아시아에서는 싱가포르 항만에서 LNG 병커링을 하는 조건으로 LNG 추진선 신조에 필요한 자금을 지원해주는 펀드를 운영하는 등 LNG 기반시설구축에 적극적이다.

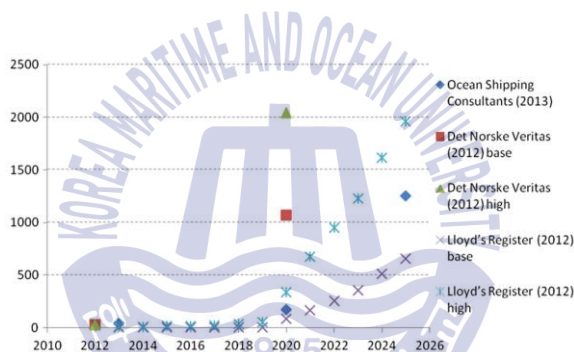


Figure 2-3 Summary of forecasts on LNG-fuelled shipping fleet in the reviewed literature, number of ships (Aronietis, 2016)[17].

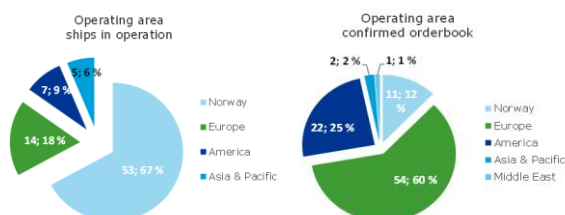


Figure 2-4 LNG fuelled Ship operation Area updated by March 2016

* Excluding LNG carriers and inland waterway vessels (DNV-GL, 2016) [2]

2.5 선종별 LNG 연료추진선 탱크 배치 분석

운항중인 LNG 연료 추진선은 대부분 “타입 C 독립형 탱크-실린더형”을 연료탱크로 적용하였으며, 선박 특성에 따라 연료 탱크를 다르게 배치하였다. 이를 정리하면 **Table 2-4** 와 같다. 갑판에 충분한 공간이 확보될 경우에는 갑판 위에 탱크를 설치하는 경우가 많다. 이를 통해 가스 누출에 대한 안정성을 확보할 수 있기 때문이다.

탱크 배치방향의 경우, 선박의 좌우동요(Rolling)시 탱크 내부 슬로싱 발생을 최소화 하기 위해 탱크를 종방향으로 배치하는 경우가 많다.

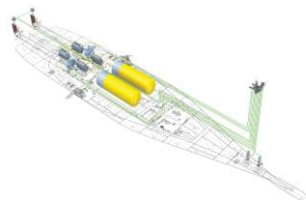
Table 2-4 LNG fueled ship reference and tank arrangement

Ferry : Viking Grace (Malcolm Oliver, 2016)[18]



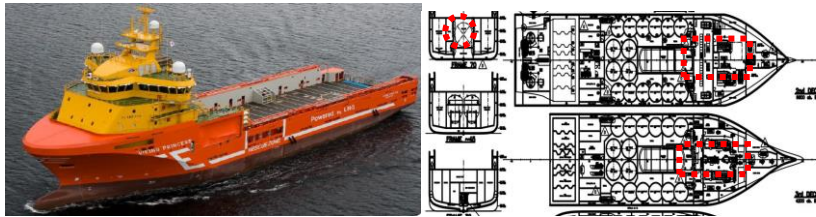
메인 엔진	4 electric engines (Wartsila 8L50DF), 30,300 kW
LNG 탱크	187 m ³ x 2 (Type C, Horizontal)
LNG 탱크 배치	Aft, Opendeck

Ferry : STAVANGERFJORD (Wursig, 2013)[19]



메인 엔진	Rolls Royce, 35:40V12PG with GRU x 4
LNG 탱크	300 m ³ x 2 (Type C, Horizontal)
LNG 탱크 배치	Mid, Under Deck

Platform Supply Vessel : Viking Princess (Great Lakes Maritime Research Institute, 2012)[20]



메인 엔진	Wärtsila 6L34DF 2 x 2,610 kW , Wärtsila 6L20DF 2 x 1,056 kW
LNG 탱크	233 m ³ (Type C, Horizontal)
LNG 탱크 배치	Mid, Under Deck (2 nd & 3 rd Deck)

Car/Passenger Ferry : Fjordi



(Source : www.rolls-royce.com)

메인 엔진	Rolls-Royce, 2 x KVGS-12G4
LNG 탱크	Type C x 2, Horizontal
LNG 탱크 배치	Under deck

Container Ship : TOTE



(Source : Toteinc.com)

메인 엔진	MAN Diesel&Turbo 8L70ME-C8.2-GI
LNG 탱크	900 m ³ x 2 (Type C, Horizontal)
LNG 탱크 배치	Aft, Opendeck + Casing

Con-Ro 2400 TEU : Crowley (Under Construction)



(Source : www.lngworldnew.com)

메인 엔진	MAN Diesel&Turbo, 8S70ME-C8.2GI
LNG 탱크	Type C x 3, Horizontal
LNG 탱크 배치	Mid, Under Deck

Cement Carrier : Greenland, Erik Thun



(Source : www.ferus-smit.nl)

메인 엔진	Wärtsilä 6-cylinder 34DF
LNG 탱크	130 m ³ (Type C, Vertical)
LNG 탱크 배치	Foreship, Under Deck

General Cargo (HØYDAL)



(Source : www.nskshipdesign.com/)

메인 엔진	Rolls-Royce Gas Engine C25:33L6PG
LNG 탱크	90 m ³ (Type C, Horizontal)
LNG 탱크 배치	Aft, Open Deck

Tug Boat : SANMAR (SANMAR, 2014)[21]



(Source : <http://www.eurotugowners.com/>)

메인 엔진	Rolls-Royce C26:33L6PG
LNG 탱크	80 m ³ (Type C, Vertical)
LNG 탱크 배치	Mid, Under Deck

PCTC : UECC



(Source : www.uecc.com)

메인 엔진	MAN Diesel&Turbo, 8S50ME-C8.2GI
LNG 탱크	Type C x 3,Horizontal
LNG 탱크 배치	Aft, Under Deck

Double Hull Oil/Asphalt Tanker : Damia Desgagnes



(Source : www.groupeledesgagnes.com)

메인 엔진	Wartsila 5RT-flex50 DF
LNG 탱크	625 m ³ (Type C)
LNG 탱크 배치	Mid, Open Deck

Oil/Chemical Tanker : Ternsund (Termtank, 2016) [22]



(Image copyright © Mercator Media 2016)

메인 엔진	Wartsila RT-flex50 DF
LNG 탱크	Type C x 2, Horizontal
LNG 탱크 배치	Mid, Open Deck

Chemical Tanker: Bit Viking (Conversion)



(Source : www.lngworldnew.com)

메인 엔진	Wärtsilä 6L50DF x 2
LNG 탱크	500 m ³ Tank x 2 (Type C, Horizontal)
LNG 탱크 배치	Mid, Open Deck

LNG Carrier : Creole Spirit



(Source : <http://worldmaritimeneews.com/>)

메인 엔진	MAN Diesel&Turbo, 5G70ME-C9.5GI
LNG 탱크	LNG Cargo Tank



메인 엔진	MAN Diesel&Turbo 2 x7S70 ME-C (18,940 kW*2)
LNG 탱크	LNG Cargo Tank

2.6 LNG 연료저장탱크에 대한 기술

IMO는 LNG의 하중을 선체 구조강도에 영향을 주지 않고 탱크자체로 견딜 수 있는지 여부 즉, 자체지지(Self-Supporting) 여부에 따라 멤브레인 탱크(Membrane Tank)와 독립형 탱크(Independent Tank)로 구분한다. 독립형 탱크는 설계압력 및 구조안정성을 고려하여 타입 A, B, C로 구분한다. 이는 Figure 2-5와 같이 도식된다.

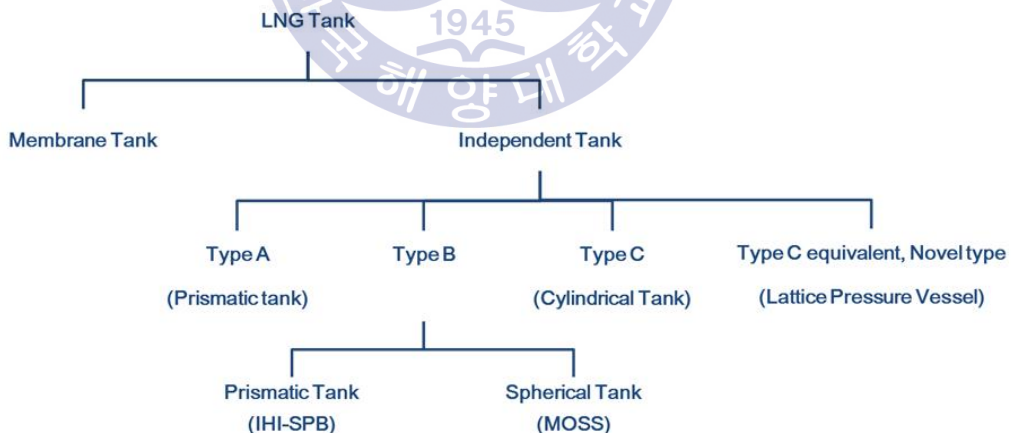


Figure 2-5 Classification of LNG tanks by IMO

2.6.1 멤브레인 타입 탱크

멤브레인 탱크는 **Figure 2-6**과 같이 자체지지 능력 없이 탱크의 하중이 내각(Inner Hull) 자체에 전해지는 구조로, 방열재 및 0.7 mm ~ 1.5 mm의 얇은 막으로 구성된 탱크이다. 선형을 따라 설계할 수 있어서 공간 효율이 좋으나, 최고설계압력은 0.25 barg로 압력변화에 매우 민감하며 슬로싱 문제가 있다. LNG 누출로 인하여 선체가 손상되는 일을 방지하기 위해 탱크 전체를 둘러싼 이중방벽이 요구된다. 멤브레인은 과응력(Over Stress)을 받지 않고, 열팽창 및 열 수축에 견딜 수 있도록 설계된다. LNG 운반선 화물탱크 종류로는 NO96, Mark III, Mark V, CS 1, KC-1, KC-S 등이 있지만 LNG 연료 탱크 적용사례는 전무하다.

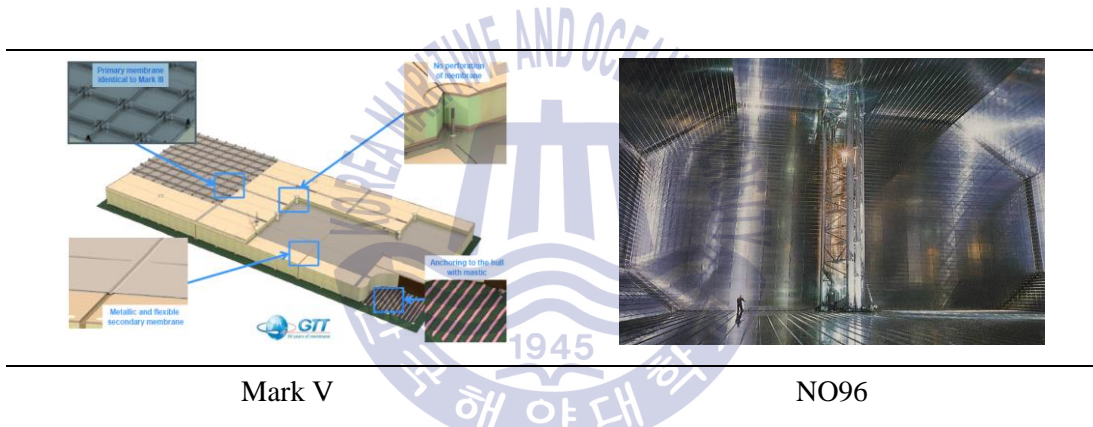
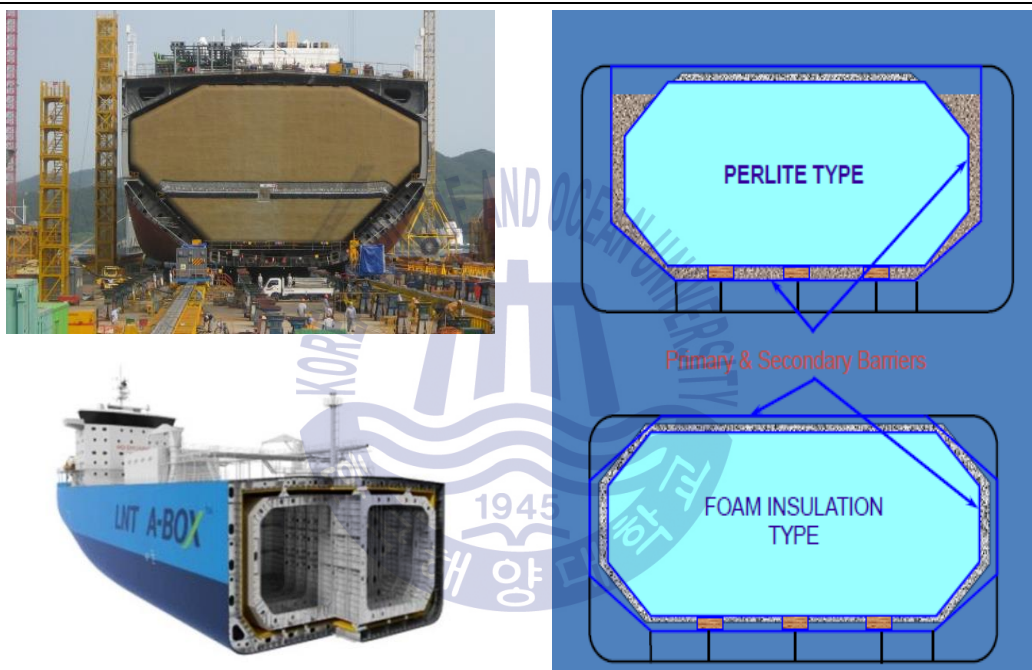


Figure 2-6 Membrane tank

2.6.2 타입 A 독립형 탱크

타입 A 독립형 탱크는 **Figure 2-7**과 같이 평편한 판 위에 제작되며 내부 보강재 (Internal Stiffening)를 요하는 각형구조의 탱크이다. 선급 규칙에 따라 강도 계산을 통한 구조설계를 하여 만들어지나, 피로강도(Fatigue Strength)는 고려되지 않는다 (IHI Engineering, 2015)[24]. 선형과 비슷하게 설계할 수 있어 공간활용도가 좋으며 LPG 운반선에 적용된 사례가 있다. 탱크의 최고 설계압력은 0.7 barg이다. 이는 유체가 완전 냉각 상태로 대기압 정도의

압력을 유지해야 함을 의미한다. 타입 A 탱크에 사용되는 재질은 균열전파에 대한 저항성이 없기 때문에, 안정성 확보를 위해서 탱크는 전체의 이중방벽(Complete Secondary Barrier)이 요구되며 단열재로 둘러 쌓여 있다. IGC Code에서는 탱크 누설이 생길 경우 15일 이상 이중방벽에 의해 견딜 수 있어야 함을 규정한다. 가연성 가스를 운반하는 선박의 경우 화물탱크와 이중방벽 사이의 Hold Space에 불활성가스(Inert Gas)를 채워야 하는데, 이는 고비용이 요구되며 LNG 연료탱크로 적용된 사례가 없다.



(Source : Bureau Veritas)

Figure 2-7 IMO Type A independent tank

2.6.3 타입 B 독립형 탱크

타입 B 독립형 탱크는 **Figure2-8**과 같이 평편한 판 위에 각형으로 제작되거나 구형상으로 제작된다. 가장 일반적으로 알려진 타입 B 탱크의 형상은 모스 타입(MOSS Type)으로 알려진 구형상이다. 각형 타입 B 탱크로는

IHI사의 SPB탱크가 있다. 타입 B 독립형 탱크는 타입 A 독립형 탱크에 비해서 응력, 피로 수명 및 균열 특성을 정밀 분석하여 설계하고 모델테스트를 통해 검증한다. 강화된 설계기준에 의해 제작되기 때문에, 타입 B 독립형탱크는 드립 트레이(Drip Tray) 형상의 부분적인 이중장벽(Partial Secondary Barrier) 만 설치한다. 탱크의 최고 설계압력(Maximum Design Vapour Space Pressure)는 0.7 barg이다. LNG 운반선에 적용된 사례는 많으나, LNG 연료탱크로 적용된 사례는 없다. 하지만 타입 B 탱크는 기화율(Boil-off Rate, BOR)이 0.2~0.6%/day로 기화가스(Boil-off Gas, BOG)에 대한 컨트롤이 쉽고 슬로싱에 강한 특징이 있어서, LNG 연료 탱크로 적용 후보로 논의되고 있다.

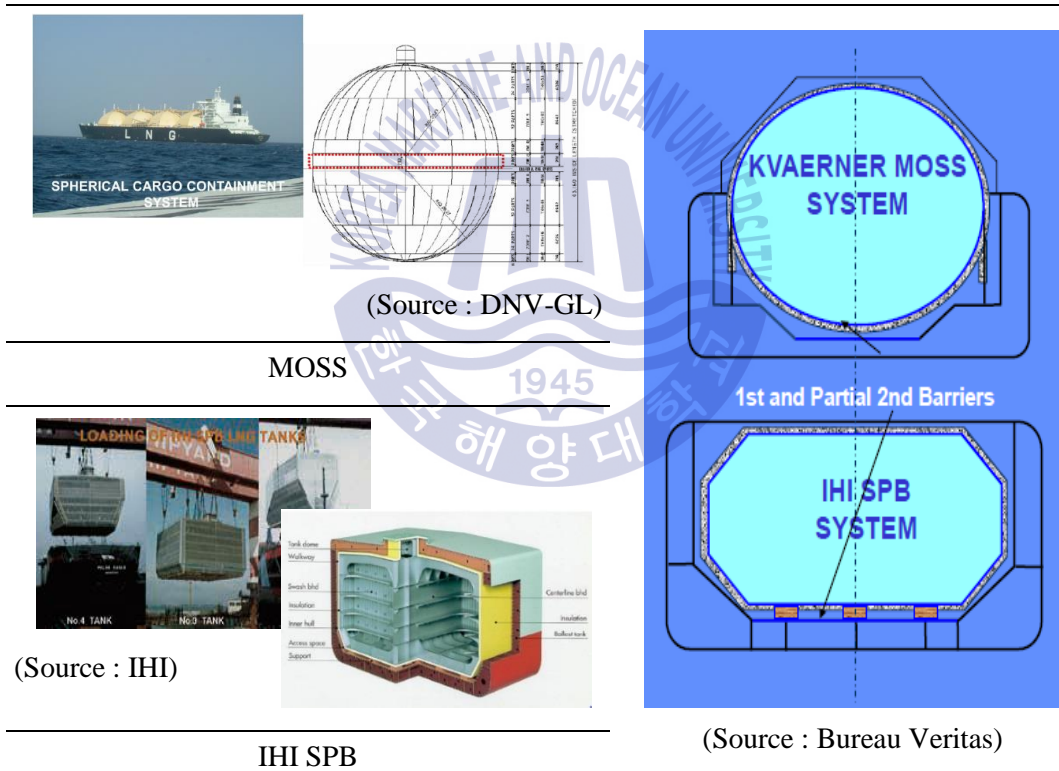


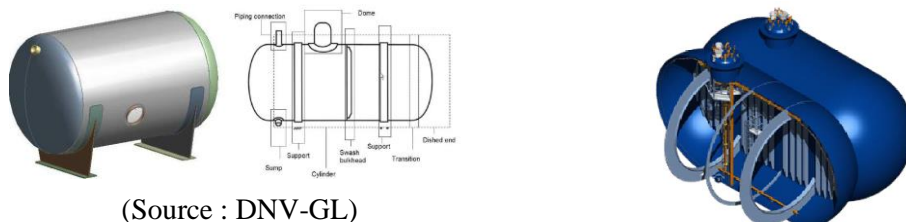
Figure 2-8 IMO Type B independent tank

LNG를 연료로 사용하는 선박의 경우, 경제성을 높이기 위해 이중 연료 엔진을 적용하여, LNG와 액체연료를 필요에 따라 전환하며 사용한다. 타입 B 독립형탱크는 설계 압력이 0.7 barg로 낮기 때문에, LNG를 연료를 사용하지

않을 경우에 발생하는 NBOG(Natural Boil-Off Gas)에 대한 별도의 대책이 요구된다. IHI-SPB 타입 B 독립형탱크는 LNG를 연료로 사용하지 않을 때 발생하는 NBOG를 발전기(Generator)의 연료로 사용할 수 있다. 이는 발전기 또한 이중 연료 컨셉(Dual Fuel Concept)이 적용되어야 함을 의미하고, 그렇지 않을 경우 재액화 등 다른 대책이 필요하다.

2.6.4 타입 C 독립형 탱크

타입 C 독립형 탱크는 **Figure 2-9** 과 같이 구형 혹은 실린더형의 압력용기로 최고설계압력은 2 barg 이상으로 유지할 수 있다. 타입 C 독립형 탱크는 압력용기 규정에 맞춰 제작되며 정밀한 강도 분석을 하기 때문에 이중장벽이 필요하지 않으며 Hold Space는 불활성 가스 혹은 건 공기에 의해 채워진다. 일반적인 타입 C 독립형 탱크는 실린더 형으로 선체 공간 활용도가 떨어지며 제작 가능한 탱크의 크기가 한정되어있다. 그러나 설계압력이 높기 때문에 0.14~0.2%/day의 BOR로 발생하는 BOG 압력을 견딜 수 있어 별도의 BOG 처리장치를 요하지 않으며 실린더형 탱크는 수직 혹은 수평으로 배치되고 설치가 용이하다. 슬로싱/롤오버에 강하고 유지비용(Maintenance Cost)이 적게 드는 장점이 있다. 현존하는 대부분의 LNG연료탱크에 적용되었으며 일반 실린더 타입의 경우 10 m³-10,000 m³까지 용량을 설계 할 수 있으나 현재까지는 500 m³까지가 상용화된 크기이다. Bi-lobe 탱크의 경우 100m³-20,000 m³까지 용량 설계가 가능하다.



(Source : DNV-GL)

Cylinder Type

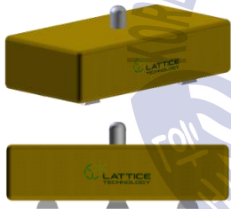


Bi-lobe Type

Figure 2-9 IMO Type C independent tank

2.6.5 Type C equivalent, novel type : 격자형 압력탱크(LPV)

본 연구에 채택된 격자형 압력탱크(Prismatic Pressure Vessel)는 LPV (Lattice Pressure Vessel) 타입이다. LPV (Lattice Pressure Vessel)는 격자형(Prismatic Type) 압력탱크이며, IMO IGC/IGF Code에서는 “Type C equivalent, novel type”으로 분류된다. LPV는 기존 타입 C 독립형 탱크의 장점을 유지하면서, 탱크의 형상을 자유롭게 변경할 수 있어 선내 공간활용도가 좋다. LPV는 모서리 부분의 형상에 따라서, FW-LPV(Fit Wall), RC-LPV(Round Corner), RW-LPV(Round Wall)로 나눌 수 있으며 각각의 특징은 **Table 2-5**와 같다.

Table 2-5 Type of LPV (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]

Item	FW-LPV (Fit Wall)	RC-LPV (Round Corner)	RW-LPV (Round Wall)
Type of tanks			
Type	Type C	Type C	Type C
Design pressure	2.0 ~ 20.0	2.0 ~ 20.0	2.0 ~ 20.0
Volume of unit tank	5 ~ 40,000	5 ~ 40,000	5 ~ 40,000
Volume efficiency	0.94 ~ 0.97	0.89 ~ 0.93	0.82 ~ 0.90
Weight (Cost)	Reference	0.7 ~ 0.8 of FW-LPV	0.4 ~ 0.6 of FW-LPV
Relative Advantages	Higher Volume Efficiency Lower Cost		

LPV는 **Figure 2-10**과 같이 형상을 자유롭게 바꿀 수 있다는 점에서 전선종의 요구조건에 맞는 다양한 형상의 탱크설계가 가능하다. LNG 연료추진선에 적용되는 연료 탱크뿐만 아니라, 부유식 발전플랜트에서 요구되는 초대형 LNG 탱크(9% 니켈강, 6 barg, 5,000 m³)도 적용 가능하다.

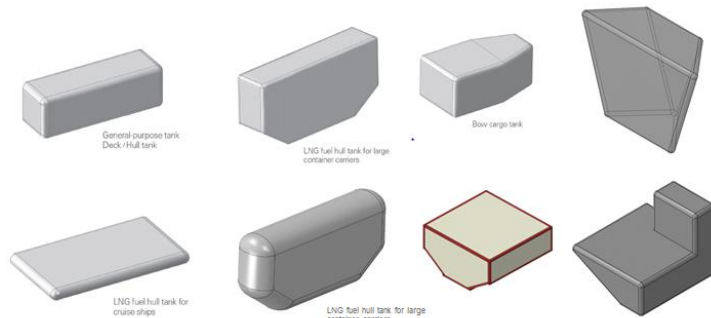


Figure 2-10 Various shape of LPV tanks (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]

2013년 프로토타입 탱크(탄소강, 10 barg, 80 m³)를 제작하였으며, 2015년 고망간강을 사용한 프로토타입 탱크(10 barg, 50 m³)를 제작하여 선급승인을 받았다. 각각의 프로토타입의 사양은 **Table 2-6**와 같다. **Figure 2-11**와 **Figure 2-12**은 각각 두 번째와 세 번째 프로토타입 탱크를 나타낸다.

Table 2-6 LPV proto-type tank list (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]

Prototype tank	I	II	III
Design pressure, bar	9.5	10	10
Hydraulic test pressure, bar	15	15	15
Dimension, H (m) x W (m) x L (m)	4 x 4 x 5	2.2 x 2 x 11.8	1.8 x 3.6 x 3.6
Volume, m ³	80	50	22
Material	SA-516	High Manganese	SA-240
Target fluid	Water for test	LNG	LNG
Certificate	ASME U2	Design approval from KR	ASME U2



Figure 2-11 LPV prototype tank II (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]

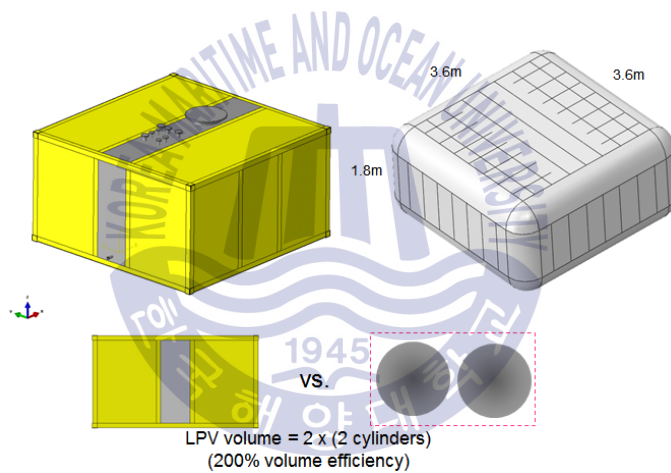


Figure 2-12 LPV prototype tank III (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]

제 3 장 LNG 연료추진 50k 벌크선의 격자형

압력탱크(Prismatic Pressure Vessel, LPV)설계

3.1 연구 목적 선박의 기본 제원

3.1.1 선종 및 항로 선정 배경

ECA를 항해하는 주요 선박을 평가하기 위해서는, 대형선이 허브(Hub)항에 운반한 물자를 소형선을 이용하여 분배 운송하는 물류구조를 이해하여야 한다. 이러한 관점에서 ECA규제를 만족하기 위한 경제성을 분석하였을 때, 비교적 짧은 시간 ECA지역을 항해하고 주로 원양을 항해하는 대형선박 보다 ECA내 주요 항로를 운항하는 소형선박 위주로 LNG연료추진선이 증가할 가능성이 높다. 이는 LNG 연료의 경제성이 기존 연료에 비해 월등한 경쟁력을 갖지 않는다는 가정하에 성립한다. 미국의 경우는 LNG의 가격 경쟁력이 절대적으로 우세하기 때문에 미국을 경유하는 선박의 경우에는 대형 선박 또한 LNG연료추진을 적용할 가능성이 높다.

현재 운항중인 LNG연료추진선의 경우 연안을 항해하는 소형선이 대부분이며, 선종은 페리선, 해양작업지원선(Platform Supply Vessel, PSV), 카페리/여객선, 컨테이너선, 컨테이너-로로선, 시멘트 운반선, 일반화물선, 예인선, 자동차운반선, 탱커선(원유, 아스팔트, 케미컬), LNG운반선 등으로 다양하게 개발되었다.

본 논문에서는 **Figure 3-1**에서 보듯이, 선대가 증가하는 추세에 있으며 ECA지역 점유율이 높을 것이라 예상되는 핸디막스(Handymax) 벌크선을 대상 선박으로 선정하고 이에 대한 최적 탱크배치방안을 제시한다.

벌크선은 표준설계를 활용하여 배를 건조하는 경우가 대부분이며, 본 논문에서는 50,000DWT 벌크선 표준설계도면을 활용하였다.

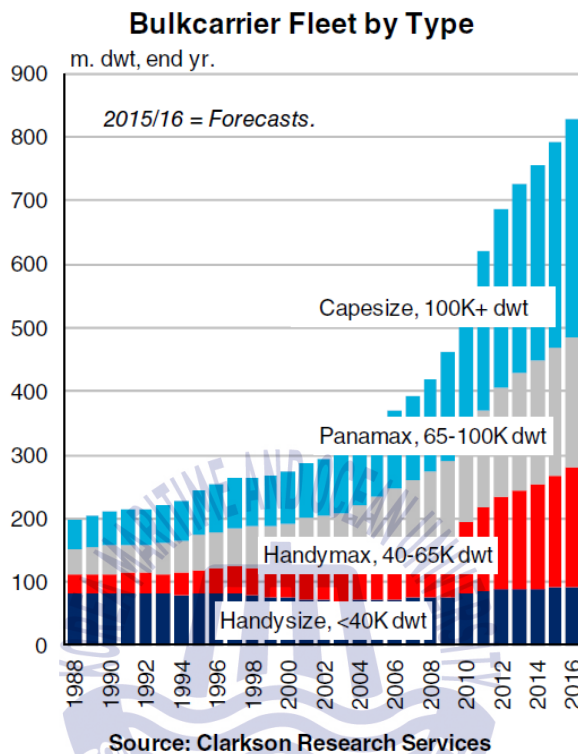


Figure 3-1 Target ship selection: bulk carrier fleet by type (Clarkson Research Services, Spring 2015) [26]

전문가들은 중국의 ECA 선포에 이어서 싱가포르, 호주, 일본 등의 ECA선포를 예상하고 있으며 환경에 대한 사회관심이 증가함에 따라 한국도 선박 배기 배출물 규제를 강화할 가능성이 높다. 본 논문에서는 해양환경규제에 적극적인 중국의 ECA 해역 중 보하이만에 위치한 텐진항과 한국 광양-포항-동해를 운항하는 LNG 연료추진 석회석 운반 항로를 가정하였다. **Table 3-1**은 목적 선박의 기본 제원을 나타낸다.

Table 3-1 Principle particulars of target ship (general)

Principle Particulars of Target Ship		
Dimensions	Length Overall	approx. 189.99 m
	Length Between Perpendiculars	183.00 m
	Breadth (moulded)	32.26 m
	Depth (moulded)	17.40 m
	Design draught, (moulded)	10.50 m
	Scantling draught, (moulded)	12.00 m
Deadweight (at even keel condition and S.G.1.025)	At design draught of 11.0 m	approx. 41,500 MT
	At scantling draught of 13.0 m	approx. 50,000 MT
Route	Tianjin, China – Gwangyang, Korea – Pohang, Korea – Mukho, Korea	approx. 970 mile
Service speed at design draught	At NCR of main engine including 10% power margin	approx. 14.0 knots

3.1.2 메인 엔진 선정

LNG연료를 사용하는 선박 추진용 엔진은 WIN-GD사의 X-DF 모델과 MAN Diesel & Turbo(MDT) 사의 ME-GI 모델이 있다. WIN-GD사의 X-DF 모델은 오토 사이클 연소 프로세스를 기반으로 설계되었다. 연소실에 공기와 연료가 섞인 상태의 연소가스가 공급되는 ‘Lean Burn’ 기술이 적용되었으며, 엔진에 약 16bar의 가스가 행정 도중에 공급된다. 가스연료는 착화성이 떨어지기 때문에 연소 전에 착화성이 우수한 액체연료인 디젤유를 파일럿 연료(Pilot Fuel)로 분사하여 연소환경을 구성한다. 엔진 자체만으로도 Tier III NO_x 규정을 만족시킬 수 있지만, 단위 일당 연료 소모량(Specific Fuel Oil Consumption, SFOC)의 약 2%-4%에 해당하는 다량의 메탄 가스가 연소 프로세스 도중에 누설되는 메탄 슬립이 발생한다.

MDT사의 ME-GI 엔진은 디젤 사이클 연소 프로세스를 기반으로 설계되었다. 디젤사이클을 채택함으로써 높은 효율을 가지며, 공기가 완전히 압축된 상사점(Top Dead Center, TDC) 근처에서 가스 연료가 분사되기 때문에 300 barg라는 고압의 분사압력이 요구된다. 엔진 자체만으로 Tier II 규정을 만족시킬 수 있으나, Tier III 규정 만족을 위해서는 SCR 및 EGR 등의 추가 장치를 설치 해야 한다. X-DF엔진과 ME-GI엔진의 특성을 비교해보면 **Table 3-2**와 같다.

Table 3-2 Comparison between ME-GI and X-DF (Hyundai Heavy Industries, 2016) [27]

Engine Type	MAN B&W ME-GI	WinGD X-DF
	Diesel Cycle	Otto Cycle
Power density	Unchanged	Reduced
Diesel Mode Efficiency	Unchanged	Reduced
Methane Number	Insensitive	Sensitive
Knocking	None	Sensitive
Misfiring	None	Sensitive
Load response	Unchanged	Load ramp required
High Ambient Temp	Insensitive	Sensitive
Gas Running Mode	0-100% load	0-100% load
Pilot fuel	3%	approx. 1%
HFO as pilot fuel	Yes	No
Dual fuel capacity	Yes	Yes
NO _x	~20% reduction	~85% reduction
Methane slip	0.1% of SFOC	2-4% of SFOC
Gas Supply Pres	300 bar	16 bar

본 논문에서는 LNG연료 추진 LNG 운반선, 컨테이너선 등 상선에 주로 적용이 되고 있는 MDT사의 ME-GI 엔진을 타겟 선박의 주 기관으로 선정하였으며 사양은 **Table 3-3**와 같다.

Table 3-3 Principle particulars of target ship (main engine)

Principle Particulars of Target Ship		
Main Engine	Type	MDT 6G50ME-C9.5-GI, Tier II
	MCR	7,400 kW x 95.0 rpm
	NCR	5,500 kW x 86.3 rpm (75 % MCR)

3.1.3 연료탱크 타입 및 용적(Volume)

현존하는 LNG연료추진선 중 대부분의 선박이 연료탱크로서 타입 C 독립형 탱크를 채택하였다. 타입 C 독립형 탱크는 슬로싱에 강하고 별도의 BOG처리가 필요 없으며, 탱크 화물구역(Hold space)이 비위험구역(Non-Hazardous Area)로 분류되는 등의 장점을 가지기 때문이다.

본 논문에서는 기존에 채택되었던 실린더형의 타입 C 독립형 탱크와, “Type C-Equivalent”로 분류되는 격자형 압력탱크인 LPV 특성을 비교 분석하여 각각에 대한 탱크 최적 배치 방안을 제시한다.

탱크의 용량은 엔진의 연료소모량과 선속, 항해일수를 고려하여 책정하였다. 위에서 책정한 MDT사의 6G50ME-C9.5-GI 엔진은 액체연료와 가스연료를 둘 다 사용할 수 있는 이중연료 엔진(Dual Fuel Engine)이다. 저위 발열량(Lower Calorific Value, LCV)이 10,200 kcal/kg인 액체연료를 사용하여 상용출력(Normal Continuous Rating, NCR)로 항해할 경우, 약 20.98 MT/day의 연료가 소모된다. LCV가 50,000 kJ/kg인 가스연료를 사용하여 NCR로 항해할 경우 약 16.41 MT/day의 가스연료가 소모된다.

중국 텐진항과 한국 광양-포항-동해 노선은 약 970 마일이며 14 노트의 선속으로 항해할 때, 연안에서는 LNG를 사용하고 원양에서는 HFO를 사용한다고 가정하였다. 이에 따라 오일 모드일 때 약 7,800마일을 항해할 수 있는 탱크용량과 가스 모드 일 때 약 3,100마일을 항해할 수 있는 용량에

3일의 여유용량을 더하여 LNG연료 탱크의 용량을 500 m³로 정하였다.
 탱크용량 관련한 선박사양은 **Table 3-4**과 같다.

Table 3-4 Principle particulars of target ship (Tank Capacity)

Principle Particulars of Target Ship		
Capacities (100% volume)	Cargo hold	approx. 56,000 m ³
	LNG fuel tank	approx. 500 m ³
	Heavy Fuel Oil tanks including settling/service tank	approx. 600 m ³
	MGO tanks including service tank	approx. 150 m ³
	Fresh water tank	approx. 150 m ³
	Water ballast tank including peak tanks	approx. 12,000 m ³

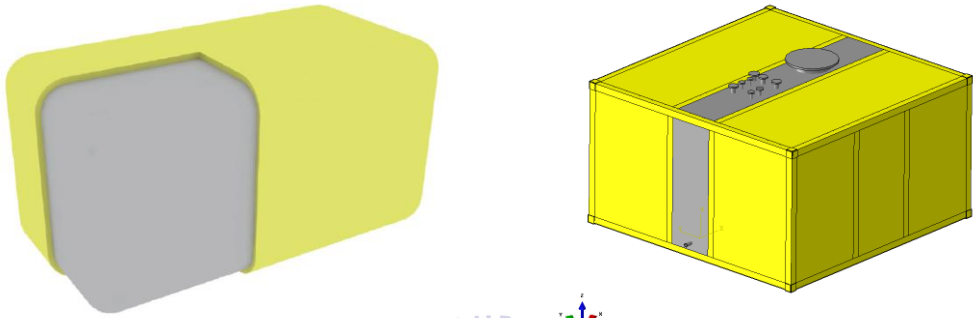
3.2 격자형 압력 용기 설계

3.2.1 기술적 특성

LPV는 IMO 타입 C 독립형 탱크 기준을 충족하는 격자형 압력용기이기 때문에, 누설이나 슬로싱에 대해 안전하다. 또한 피로강도에 강하며 BOG를 따로 처리할 필요가 없기 때문에 BOG 컴프레서나 재액화 설비 등의 추가설비를 요하지 않는다. 형태를 자유롭게 제작할 수 있어 탱크 배치 시 공간활용도 측면에서 유리하고 화물용적 손실을 최소화시킬 수 있다. LPV 타입은 설계압력을 2 bar 에서부터 20 bar까지 필요에 따라 조절 할 수 있으며 탱크 사이즈도 최대 40,000 m³까지 제작 가능하다.

LPV는 재료에 국한을 받지 않으며 LNG 탱크의 경우 알루미늄(Aluminum), 9% 니켈강, 7% 니켈강, 스테인리스 스틸, 고망간강(High Manganese Steel) 등 극저온 재료를 사용하여 제작된다. 별도의 이중장벽이 필요하지 않으며

격자형으로 표면이 편평한 형태를 가지기 때문에 단열작업(Insulation)이 용이하다. 단열 방법으로는 **Figure 3-2** 와 같이 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam) 스프레이식 단열재(Spray Insulation) 방법과 진공단열재방법이 있다. 또한 탱크 내판이 격벽(Bulkhead) 역할을 하여 슬로싱에 강한 특징을 보인다.



PUF spray insulation

Vacuum insulation

Figure 3-2 Example of LPV insulation (LATTICE TECHNOLOGY, 2016) [25]

3.2.2 격자형 압력 용기 설계 규정

LPV는 IMO IGC 규정 중에서 Part F Cargo Containment Systems of Novel Configuration, Chapter 4, IGC Code와 Appendix 5 Standard for the Use of Limit State Methodologies in the Design of Cargo Containment Systems of Novel Configuration, IGC Code를 만족하도록 설계되었으며, 수행한 분석 보고서는 **Table 3-5**과 같다. 이를 기반으로 LPV는 KR, ABS, DNV-GL 등의 선급으로부터 기본승인(Approval in Principle, AIP)을 받았다.

Table 3-5 Research list for IGC code approval of LPV (CHANG, 2015) [28]

Load type	Loads	Analysis reports
Permanent	Gravity, External	Structural analysis of LPV under dead load
Functional	Internal pressure, test	Structural analysis of LPV under internal pressure
	Static heel	Structural analysis of LPV under static heel loads
	Cargo weight	Structural analysis of LPV under cargo weight
		Ultimate load analysis
	External pressure	Structural analysis of LPV under external pressure
	Thermal	Temperature distribution of LPV Thermal stress analysis of LPV Temperature distribution around LPV Heat transfer analysis
	Vibration	Modal analysis of LPV
Environmental	Construction and Installation	Stress analysis of lifting components Stress analysis of supporting structures Estimation of support load
	Ship motion	Estimation of liquid pressure load
	Sloshing	Estimation of sloshing load
Accidental	Collision, flooding	Impact analysis of LPV
Combined	Combined loads	Structural analysis of LPV under combined static loads
		Structural analysis of LPV under combined dynamic loads
		Structural analysis of complex loading cases for LPV
		Fatigue and fracture analysis of LPV
		Buckling analysis of LPV

3.2.3 기본 공식

격자형 압력탱크는 **Figure 3-3**과 같이 하중을 분산시키기 위한 용도로 빔(Beam)구조가 더해진다. 내판(Internal Shell) 사이를 연결하는 빔으로 인해 양쪽은 힘의 평형을 유지하며 인장응력이 증가하게 된다. 선박에 적용되는 압력용기는 항해 중에 발생하는 선박의 6 자유도 운동에서도 구조물이 견딜 수 있도록 빔의 개수 및 두께 등이 설계된다. LPV에는 **Figure 3-4**에서 보듯이 다양한 종류의 내부보강방법이 있지만, 엑스빔(X-beam)을 사용한 원리는 다음과 같다.

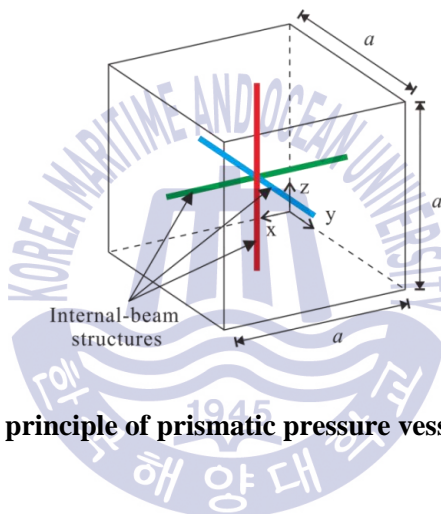


Figure 3-3 Design principle of prismatic pressure vessel. (Ahn, et al) [29]

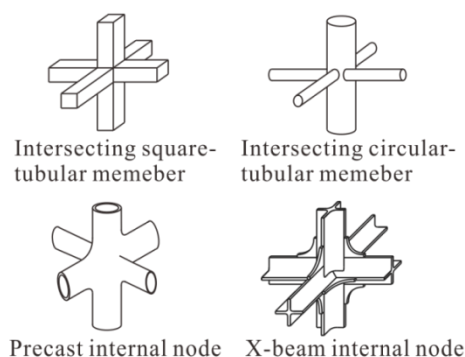


Figure 3-4 Intersecting methods for beam connections (Ahn, et al) [29]

탱크 내부압력과 빔이 받는 응력은 평형방정식에 의해서 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma A = pa^2 \quad (1)$$

σ 는 빔이 받는 인장응력을 의미하고, A 는 빔의 단면적을 말한다. a 는 빔이 포함된 한 섹션의 길이를 말한다. 빔의 단면적 A 는 견딜 수 있는 최대 허용응력을 σ_a 정함으로써 결정된다.

$$A = \frac{pa^2}{\sigma_a} \quad (2)$$

빔의 단면적 A 는 **Figure 3-5**에 나타난 3가지 변수에 의해서 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. t_x 는 빔의 두께를 의미하고, b 는 빔의 목 부분의 길이, r 은 만곡부의 지름이다.

$$A = 4(b+r)t_x + t_x^2 \quad (3)$$

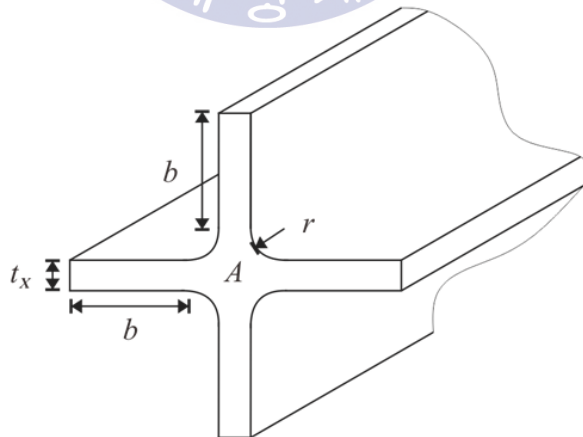


Figure 3-5 Section configuration of X-beam(Ahn, et al) [30].

위 식을 빔의 두께(t_x)를 구하기 위한 방정식으로 전환하면 (4)과 같다.

$$t_x = \sqrt{\frac{pa^2}{\sigma_a[4(b+r)+1]}} \quad (4)$$

그 밖에 내판의 두께나 보강재의 두께는 제작 환경을 고려하여 결정된다. 일반적으로 탱크의 원재료인 철판의 두께가 한정되어있기 때문에 압력용기 구조물은 보통, 40 mm 이하의 두께를 가지며 내판의 굽힘 손상을 방지하기 위해서 보강재가 적절한 위치에 설치된다. 구조물의 안정성은 유한 요소 해석법 (Finite-Element Analysis)을 통해 이루어진다(Ahn, et al., 2016)[29].

3.2.4 탱크 설계

선박설계 시 탱크 용량, 탱크 설치 위치, 설계압력, 유체의 온도 등의 기본 값을 바탕으로 격자형 압력용기를 설계한다. 본 장에서는 LPV의 여러 모델 중 X-beam 구조가 적용된 격자형 압력탱크 설계절차를 고찰한다.

압력탱크의 설계를 위해서는 ASME Code; BS 5500; API standards; EN13445; ISO 11439등의 국제 규정이 있다. 본 논문에서 설명하는 LPV(Prismatic Pressure Vessel)는 ASME Code Section VIII의 Division 2 규정을 바탕으로 설계되었다. ASME Code Section VIII의 Division 1은 일반적 형상의 실린더형 압력용기를 설계하는데 사용되는 규정이다. Division 1을 반영하여 개발된 탱크 설계 프로그램인 PV Elite, COMPRESS에 압력, 용적, 철판두께 등의 기본 입력 값을 입력하여 실린더형상의 탱크의 치수 및 형상이 도출된다. 이를 기반으로 설계를 진행한다.

격자형 압력용기인 LPV는 Division 2 Part5의 Design by Analysis Requirement을 기반으로 해석적 설계방법을 따른다. LPV 설계는 ABACUS 프로그램을 사용하여 해석한다. 선박 설계에 요구되는 형상을 프로그램에서 매핑(Mapping)한 후, 탄성계수, 푸아송비 등의 재료 물성치를 입력한다. 탱크의 해석을 위

한 온도, 압력 등의 해석조건을 입력한 후 기계적 응력, 열응력 등의 결과값을 확인하며 피로해석을 실시한다.

설계하중을 평가하기 위해서는 설계 압력, 최고압력, 수압 시험 압력, 동적 하중, 및 동적 가속도를 고려하여야 한다. 설계 압력은 설계 증기압에 설계 마진이 더해진 값이다. 본 장에서 설명하는 LPV X-beam 탱크의 설계 압력은 6 barg이다. 최고압력은 탱크의 취약부의 파괴 여부를 보여주는 수치이다. 최고 압력을 결정하기 위해서는 취약부의 응력 변형률 곡선(Stress-strain curve)을 해석프로그램에 입력해야 한다. 응력-변형률 곡선을 도출해내기 위해서는 ASME Code Section VIII Division2에 재료별로 제시된 식을 활용한다. 선박의 동적 하중을 탱크에 반영하기 위해서는 IGF Code에 수직, 횡방향, 종방향으로 나누어 제시된 식을 활용하여 계산하며 각각의 동적 가속도에 대한 응력을 실험한 결과는 **Figure 3-6**과 같으며 LPV는 모든 방향의 동적 가속도로부터 안정성을 보였다.

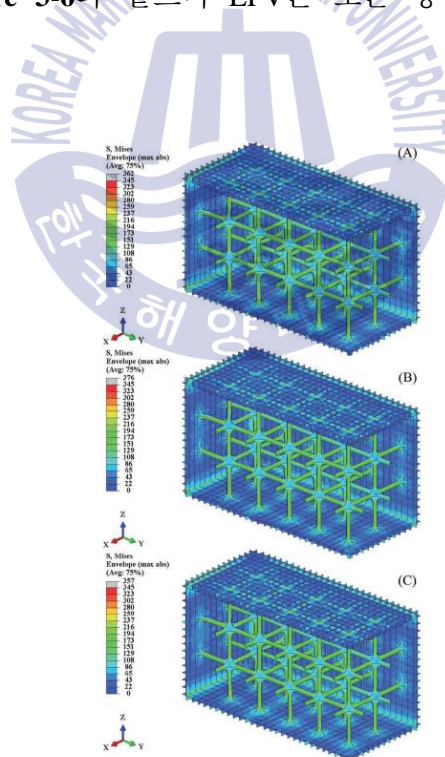


Figure 3-6 Equivalent stress (in MPa) because of accelerations: (a) vertical, (b) transverse, and (c) longitudinal directions. (Ahn, et al., 2016)[29]

탱크 내부를 얇은 보로 지지하는 X-beam 구조의 경우에는 좌굴에 대한 안정성도 확보를 하여야 한다. 축방향으로 큰 하중이 가해질 경우 구조가 휘어지는 좌굴 현상이 발생하게 되는데 **Figure 3-7**에서 보듯이 LPV X-beam 구조의 탱크는 약 30 barg에서 좌굴 이상 현상을 확인할 수 있다. 이는 탱크 설계 압력 6 barg 의 약 5배가 되는 수치로, LPV X-beam 구조는 좌굴에 대해 안정하다.

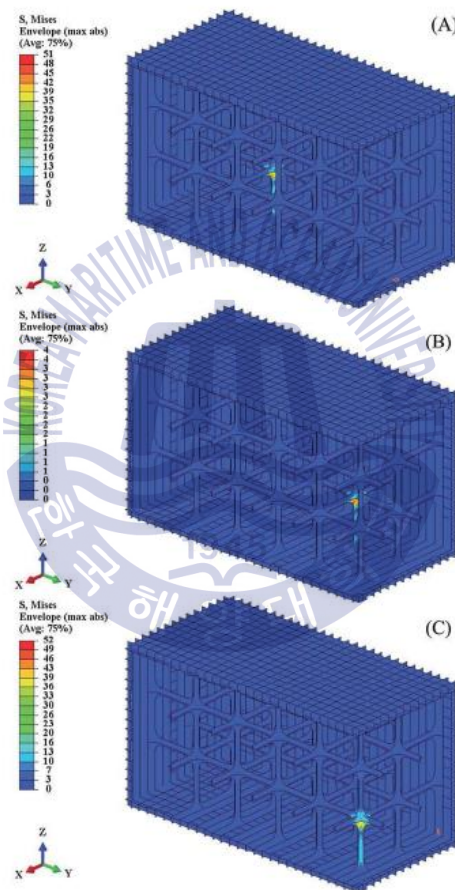


Figure 3-7 Buckling stress distribution (in MPa) based on critical loadings: (A), (B), and (C) bar. (Ahn, et al., 2016)[29]

이외에도 탱크의 온도분포에 따른 열응력 분석, 슬로싱 하중 분석, 균열전파성 등을 유한요소해석법을 통해 검증한다. 탱크가 제작된 후에는 설계압력의 1.43배의 압력으로 수압 시험을 진행한다.

3.2.5 탱크 설계 도면

엑스빔이 설치된 LPV 탱크의 도면은 **Figure 3-8**과 같으며 평편한 판 사이를 빔구조가 지지하고 있는 형상이다.

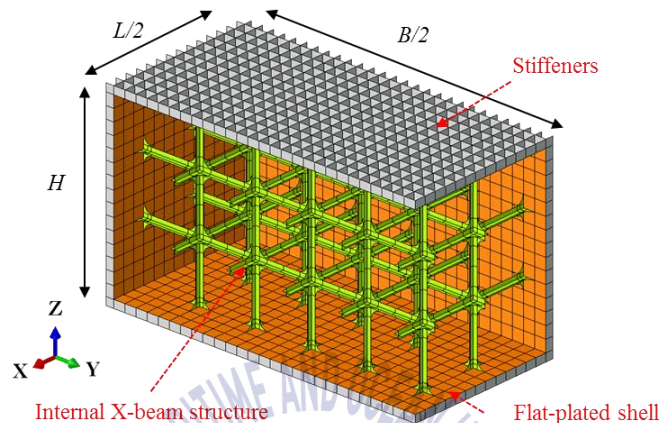


Figure 3-8 Configuration of prismatic pressure vessel (X-beam FW LPV) (Ahn, et al) [29]

플레이트(Plate) 구조가 내관을 지지하고 있는 형태의 LPV 또한 개발되었는데, 2013년 80 m³ 용량의 첫 번째 LPV 프로토타입 탱크에 적용된 구조로, **Figure 3-9**과 같다.

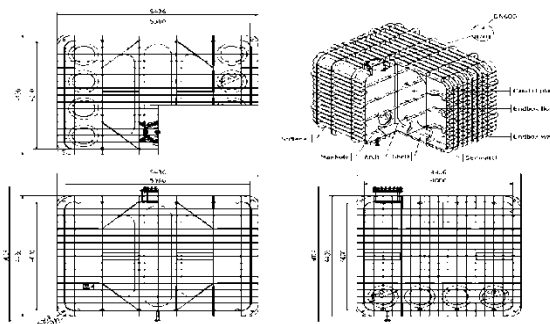


Figure 3-9 Configuration of prototype for prismatic pressure vessel (Plate FW-LPV) (unit: mm) (Ahn, at al)[30]

기존의 실린더형 탱크보다 공간 효율성을 높이면서 격자형 모양인 FW-LPW 보다 탱크의 무게를 낮춘 모델로 RW-LPV 가 있는데 그 형상은 **Figure 3-10** 과 같다.

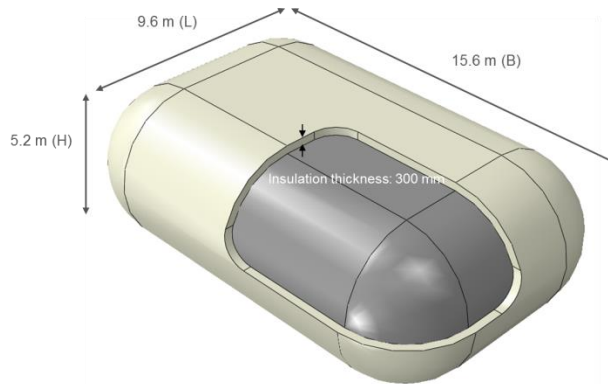
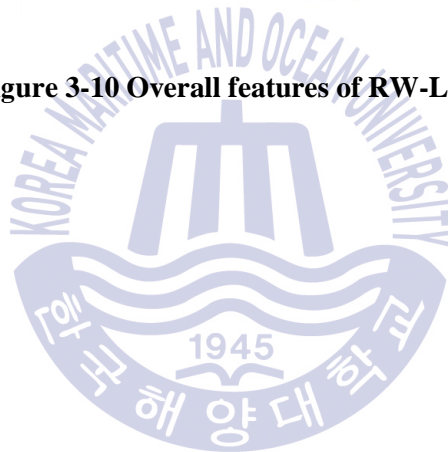


Figure 3-10 Overall features of RW-LPV



제 4 장 결과 및 고찰

4.1 실린더형 탱크와 격자형 탱크의 기술비교

최적 탱크 배치문제를 고찰하기 위해, 4.1에서 선박의 경제성과 안정성 확보를 위한 연료탱크의 기술적 특성을 검토하고, 4.2에서 탱크의 배치를 위해 고려해야 하는 사항을 고찰한 후, 4.3에서는 탱크 최적배치 방안을 제시하였다.

4.1.1 부피 효율 및 무게중심 고찰

선박의 제한된 공간을 효율적으로 활용하기 위해서는 LNG탱크의 공간효율(Volume Efficiency)을 고려해야 한다. 기존의 타입 C 독립형 탱크는 원기둥 형의 캡(Cap)을 씌운 실린더 형으로 헤드(Head)의 종류로는 타원형 헤드(Elipsoidal Head), 접시구형 헤드(Torispherical Head), 반구형 헤드(Hemispherical Head)가 적용될 수 있으며 헤드 형상은 탱크의 공간효율에 영향을 미친다. 탱크 헤드 형상 별 실린더형 압력 탱크 용적을 구하는 공식은 **Table 4-1**과 같다.

격자형 타입인 LPV 탱크는 각 기둥형이 가장 기본적인 모델이지만, 사용자의 요구에 따라 원형 벽(Round wall)을 적용할 수도 있고 선박의 데드스페이스(Dead Space)에 맞춰진 특수형태를 가질 수도 있다. 본 논문에서는 실린더형 탱크와 LPV의 부피효율을 비교하기 위해서 폭(W)과 높이(H)가 실린더형 탱크의 지름(D)과 같다고 가정하고 **Table 4-2**과 같이 용적을 구하는 공식을 도출해냈다.

Table 4-1 Type C tank volume comparison by head type

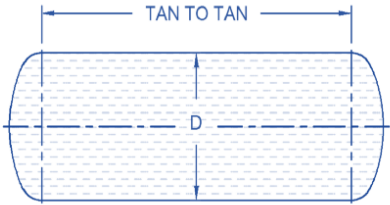
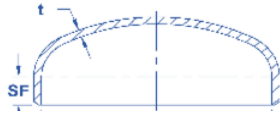
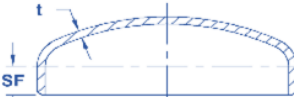
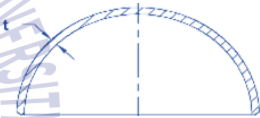
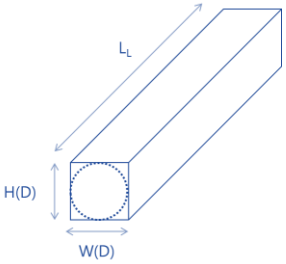
	 <p>ELLIPSOIDAL HEAD</p>
	<p>Ellipsoidal Head Volume $= (\pi * D^3) / 24 + (\pi * D^2 * S.F) / 4$</p>
<p>Type C 탱크 용적 (2:1 Ellipsoidal head) $\text{Volume} = (\pi * D^3) / 12 + (\pi * D^2 * L_c) / 4$</p> <p>Type C 탱크 용적 (Torispherical head) $\text{Volume} = (0.1694 * D^3) + (\pi * D^2 * L_c) / 4$</p>	 <p>TORISPHERICAL HEAD</p>
<p>Type C 탱크 용적 (Hemispherical head) $\text{Volume} = (\pi * D^3) / 6 + (\pi * D^2 * L_c) / 4$</p>	<p>Torispherical Head Volume $= (0.0847 * D^3) + (\pi * D^2 * S.F) / 4$</p>
<p>$* \pi = 3.141$</p> <p>D = Inside Diameter of Vessel L_c = Length tan to tan (Cylinder)</p>	 <p>Hemispherical Head</p>
	<p>Hemispherical Head Volume $= (\pi * D^3) / 12$</p>

Table 4-2 Fit wall LPV tank volume (W=H=D)

	<p>Type C-equivalent tank, LPV 탱크 용적 $\text{LPV Volume} = H \times W \times L_L = HWL_L = D^2 L_L$ $* H = \text{height}$ $W = \text{width}$ $D = \text{Diameter for Cylinder Tank}$ $L_L = \text{Length (LPV)}$</p>
---	---

타겟 선박에 적용된 500 m² 실린더형 탱크와 격자형 탱크(LPV)의 공간효율성을 비교한 결과는 탱크의 배치공간을 고려하여 4.3.2에서 제시한다.

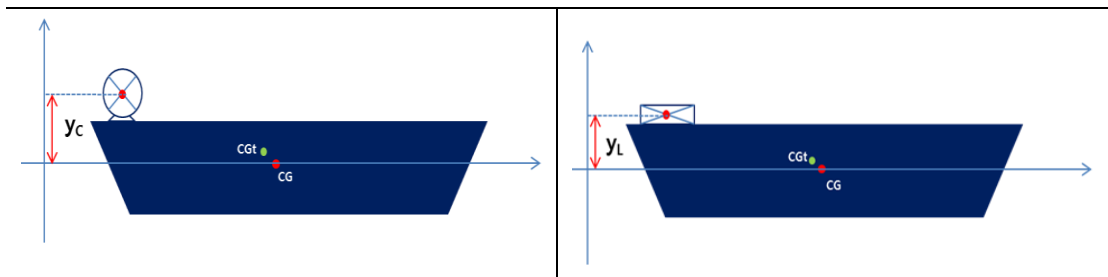
선박의 무게중심은 선박의 복원성과 안정성에 큰 영향을 미친다. 일정한 배수용적을 가지는 선박에서 선박 전체의 무게중심이 낮을수록 큰 복원력을 가지게 된다. 연료탱크와 같은 중량물은 선박의 상부 보다는 하부에 배치하는 것이 선박의 복원성에 좋다. LNG 연료탱크의 경우 기존 HFO탱크에 비해 용적이 2배이상 증가 하였고 저온 및 누설에 대한 강도 높은 대책이 요구됨에 따라 탱크 배치에 한계가 있어 연료탱크를 갑판 상부에 배치하는 경우가 많다. 이로 인해 선박 전체의 무게중심이 상승하기 때문에 선박복원성에 대한 고찰이 필요하다. 탱크의 무게중심이 선박의 무게중심 변화에 미치는 영향을 다음 식과 같이 표현된다.

$$y_{CGt} = \frac{m_{ship}y_{CG} + m_{tank}y_{tank}}{m_{ship} + m_{tank}}$$

선폭이 한정되어있는 경우 실린더형 탱크는 실린더의 직경을 크게 하여 용량을 증가시켜야 하며, 이 경우 탱크자체의 무게중심이 상승된다. 반면에 격자형 탱크의 경우 탱크의 길이에 한계가 있더라도 높이와 폭을 자유롭게 조정할 수 있기 때문에, **Table 4-3**과 같이 탱크의 높이를 낮추고 폭을 늘리는 방법으로 탱크를 설계하면 탱크자체의 무게 중심을 낮출 수 있다.

탱크자체의 무게중심이 높을 경우 선박의 상하 좌우 운동에 의한 탱크 내 유체의 슬로싱 포스(Sloshing Force)가 증가하게 된다. 또한 바람, 온도 등 환경요소의 영향도 받게 되므로 이를 고려하여 탱크 자체의 성능과 지지 강도를 선정하여야 한다. 또한 중량물인 탱크의 무게를 선박 초기 설계 시 고려하여 선박 전체의 무게중심을 정하고 선박의 복원성을 확보 하여야 한다.

Table 4-3 Comparison of the effect to center of gravity



4.1.2 설계 하중(Design load)

압력용기는, 운영 조건에 따라 설계하중을 정하고 설계수명, 설계압력을 책정하여 선급 규칙 및 산업 표준에 따라 설계 및 제작한다. 주로 사용되는 압력 용기 설계규정으로는 “ASME Boiler and Pressure Vessel Codes”와 “EN 13458-2:2002”가 있다. 육상용 극저온 압력용기의 경우에는 쿨다운(Cool-down) 및 워밍업(Warming-up) 시에 발생하는 열 하중, 외부온도 변화에 따른 하중분석, 유체의 비중 및 탱크 재료의 무게를 고려하여 탱크의 설계 하중을 구하고 이에 따라 지지(Support) 및 단열(Insulation) 작업을 행한다.

해상조건에 설치되는 극저온 압력탱크의 경우에는 선박의 움직임, 기상조건 등 해상환경을 고려한 설계 하중을 책정하여야 하며 IMO의 IGF Code 규정과 선급규정을 만족 하여야 한다. 육상용 압력용기에 비하여 추가되는 설계 조건은 다음과 같다. 본 논문에서는 ABS의 권고사항을 기준으로 기술하였다 (ABS Houston, TX, 2013) [6].

- 선박의 6자유도 운동을 반영하여 상하동요(Heave)와 피치(Pitch)를 고려한 수직 가속도, 좌우동요(Sway)와 요(Yaw), 롤(Roll)를 고려한 횡방향 가속도, 서지(Surge)와 피치(Pitch)로 인한 종방향 가속도를 모두 고려한 동적 하중을 설계에 반영하여야 한다.

- 탱크 내의 연료가 부분적재(Partial filling) 상태일 때, 선박의 움직임에 의해

유체가 탱크 내벽을 치는 현상인 슬로싱 하중을 고려 해야 한다.

- 선박이 장시간 힐링(Heeling) 상태에 있을 때, 기울어진 탱크 내의 유체의 수직하중을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 선급 룰에서는 30° 기울어진 상태의 하중을 견디도록 권고한다.
- 탱크가 개방갑판(Open Deck)에 설치될 경우 황천 시 발생할 수 있는 Wave slap을 고려하여야 한다. Wave Slap에 의한 하중은 수선(waterline)으로부터 탱크의 거리 및 위치에 따라 다르게 적용될 수 있으며 CFD분석을 통하여 테스트할 수 있다.
- 선박의 좌초, 충돌에 의한 충격에도 견딜 수 있도록 설계되어야 하며 선박 침수 시 탱크에 작용하는 부력도 고려해야 한다.
- 선내 화재가 발생 하여 탱크 내부 온도가 상승할 경우, 최대허용 도출밸브 설정치(Maximum Allowable Relief Valve Setting, MARVs)의 20%까지 내압이 상승하여도 탱크 균열이 발생 하지 않도록 설계 해야 한다.

기존의 LNG 연료추진 선박에 적용되었던 실린더형 압력탱크 및 LATTICE Technology에서 개발한 격자형 탱크(LPV)는 모두 타겟 선박의 탱크 용량인 500 m²를 제작하는데 문제가 없다. 또한 격자형 탱크(LPV)는 IGF Code에 'Type C equivalent Tank'로 분류되어 실린더형 탱크와 동일한 성능을 인정받았으며 ABS, DNV-GL, KR등의 선급 승인을 받았으므로 탱크 성능은 검증 되었다.

4.1.3 BOG와 롤 오버(Roll over)

LNG탱크의 경우 탱크 외부의 공기와 온도차이에 의해 BOG가 발생한다. 폐쇄된 탱크 공간에서 BOG의 발생은 탱크 내압 상승의 요인이 된다. **Figure 4-1**에서 -163℃ 부근에서 약 9℃의 온도가 상승할 경우 1 barg 상승하나,

온도가 높아질수록 압력 상승폭이 커져 -124℃ 부근에서는 2℃ 온도 상승에도 같은 압력 상승 효과를 보임을 확인할 수 있다.

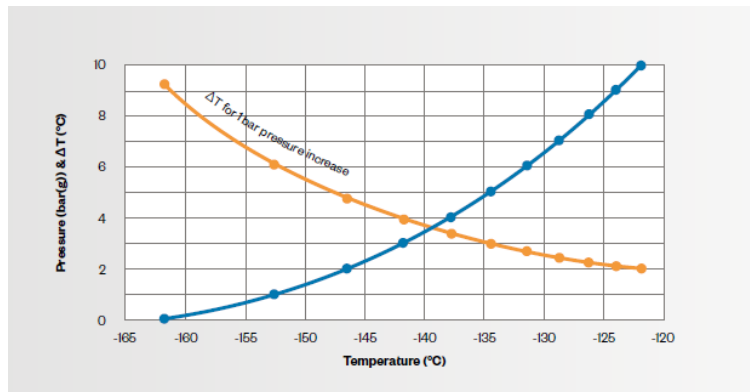


Figure 4-1 Tank pressure as a function of LNG (Methane) temperature. At atmospheric pressure, an increase of temperature with 9℃ raises tank pressure with only 1bar, but at the end 2℃ increase has the same affect (Wartsila, 2015) [31].

탱크내의 LNG의 BOR(Boil of Rate)을 구하는 방법은 하기와 같다.

$$\begin{cases} \varphi_i = U_i S_i \Delta T \\ \varphi_j = U_j L_j \Delta T \end{cases}$$

$\varphi_{i,j}$: 표면(S_i), 모서리부(L_j) 각각에서의 열전달율

U_i : S_i 에 상응하는 열전달 계수

U_j : L_j 에 상응하는 열전달 계수

각각의 LNG 탱크에 대하여 표면 부 열 전달량과 모서리부의 열 전달량을 합산하면 LNG 탱크 전체의 열 전달량이 된다.

$$\varphi = \sum_i \varphi_i + \sum_j \varphi_j$$

열 전달계수(U_i, U_j)는 탱크가 놓여지는 환경 및 단열재 등을 고려하여 결정한다. 전체 열전달을 계산 되면, BOR은 다음 식과 같이 표현된다.

$$BOR = \frac{\varphi}{d * V * L} * 3600 * 24$$

d : density of the methane

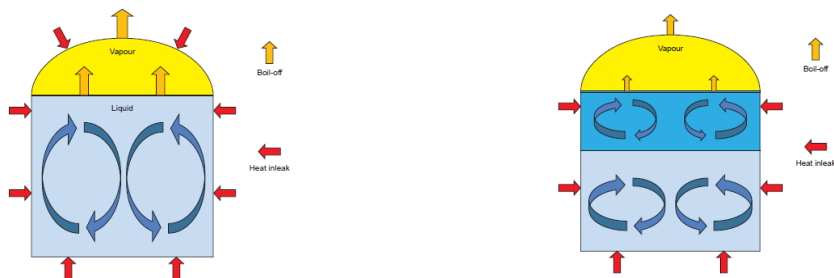
L : Vaporisation latent heat of the methane

V : Cargo Capacity(corresponding to 98.0% of the total tank capacity)

실린더형 탱크와 격자형 탱크 모두 압력용기규정에 의해 설계되었으므로 별도의 BOG 제어가 불필요하다. 반면에 멤브레인, 타입 A, 타입 B 독립형 탱크는 BOG를 제어하여 탱크 내압이 상승하는 것을 방지해야 한다.

롤 오버(Roll Over) 현상이란 **Figure 4-2**와 같이 탱크내의 서로 다른 비중의 LNG가 섞여 성층화를 이루면서 급격하게 다량의 BOG를 만들어내는 현상을 의미한다. 이를 도식화 하면 **Table 4-4**와 같다. 성층화는 기존에 탱크내부에 있던 LNG에 비해 상대적으로 밀도가 큰 LNG가 탱크 하부로 충전 되거나, 상대적으로 밀도가 낮은 LNG가 탱크 상부로 충전 될 때 발생한다. 1970년에 일본에서 발표된 자료에 의하면 두 LNG의 밀도 차가 1 kg/m³이상일 경우 LNG의 성층화가 발생한다 (Akiyama, 1980) [32].

Table 4-4 Convection Current in LNG Tank (SIGTTO, 2012) [33]



Convection Current in LNG Tank
(One density LNG)

Convection Current in LNG Tank with stable
stratification (Two density LNG)

국제 LNG 수입자그룹(International Group of Liquefied Natural Gas Importers,

GIIGNL)이 발표한 롤오버 선례조사에 따르면 약 50% 정도의 사례에서는 정상 BOR보다 10배 이하에서 BOR이 증가되었으나 12%의 경우에는 정상 BOR보다 20배를 초과하는 높은 BOR수치를 보였다.

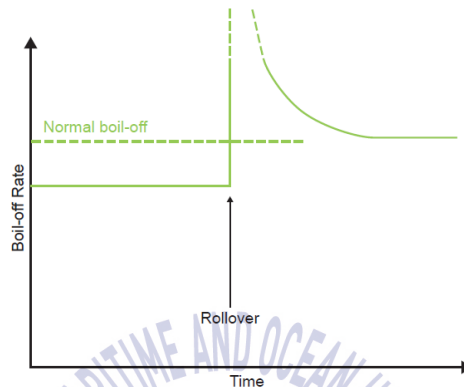


Figure 4-2 Roll-over, variation of boil-off rate with time (SIGTTO, 2012) [33]

기존의 LNG 터미널이나 LNG 운반선의 경우 보통 일정한 비중의 LNG를 저장하는 것과 달리, LNG 연료추진선박의 경우 병커링 환경에 따라 비중이 다른 LNG를 수급 받는 경우가 많다. 이에, LNG탱크를 선정하고 설계하는데 있어서 롤오버 현상을 고려해야 하고 선박 운용 시에도 이를 반영한 대책이 요구된다. IGF Code 18.4.2.1.9에는 롤오버에 고려하여 연료유 수급 매뉴얼을 만들어야 함을 명시하고 있다.

병커링 시 유입되는 LNG의 비중이 기존의 것보다 낮을 경우 하부에서 주입(Bottom Filling)을 해서 성층화를 방지할 수 있다. 하부주입을 할 경우 병커링 과정에서 LNG의 온도가 상승하여 발생할 수 있는 BOG양이 정수압(Hydrostatic Pressure)에 의하여 제한되는 장점도 있다.

유입되는 LNG의 비중이 기존의 것보다 클 경우에는 상부에서 주입(Top Filling)을 해야 한다. 그러나 상부에서 LNG를 주입하는 경우에는 주입된 LNG가 탱크상부에서 급격하게 다량의 증기를 발생시켜 압력상승을

유발하기도 하는데 이는 제어가 필요하다. 이를 제어하기 위한 간단한 방법은 유입속도를 감소시키는 것이다. 또는 LNG를 주입하기 전에 탱크 내압을 낮춘 뒤 주입하면 갑작스러운 증기발생을 막을 수 있다.

4.2 LNG연료추진선의 탱크 최적배치 시 고려사항

4.2.1 가시성(Visibility)

길이가 55 m 이상인 선박은 SOLAS regulation V/22.1.6 규정에 의거하여, (Navigation Bridge Visibility)를 확보하여야 한다. **Figure 4-3**과 같이 선교의 (Conning Position)에서 보았을 때 선박길이(LOA)의 2배 혹은 500 m 중 작은 수치만큼의 수면 가시성(Visibility)을 확보해야 한다. LNG 연료추진선의 경우 갑판상에 LNG 연료탱크를 배치할 때 가시성에 영향을 주지 않도록 설계 되어야 한다.

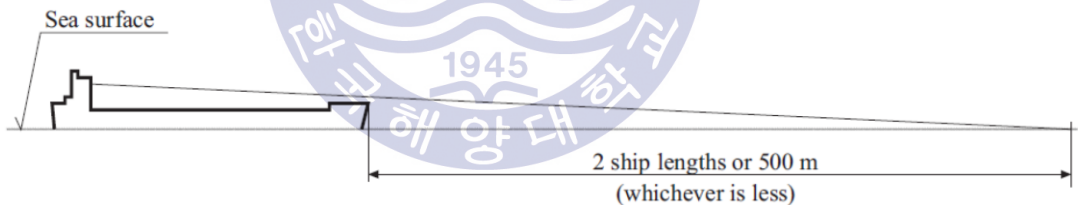


Figure 4-3Navigation bridge visibility (TURK LOYDU, 2013) [34]

4.2.2 병커링 스테이션(Bunkering station)

LNG탱크는 **Figure 4-4**와 같이 병커링 스테이션과 가스 컨슈머(Gas Consumer) 인 기관실 사이에 위치하고 있으며, 병커링 스테이션과 가스 컨슈머(Gas Consumer)사이의 거리를 최적화 하여야 LNG가 이동하는 파이프, 플랜지, 밸브, 탐지기(Detector) 등을 감소할 수 있어 선박 전체의 경제성 및

안정성에 영향을 미친다. 이러한 관점에서 IGF Code 8. BUNKERING에 기재된 병커링 스테이션에 대한 규정을 분석하였다.

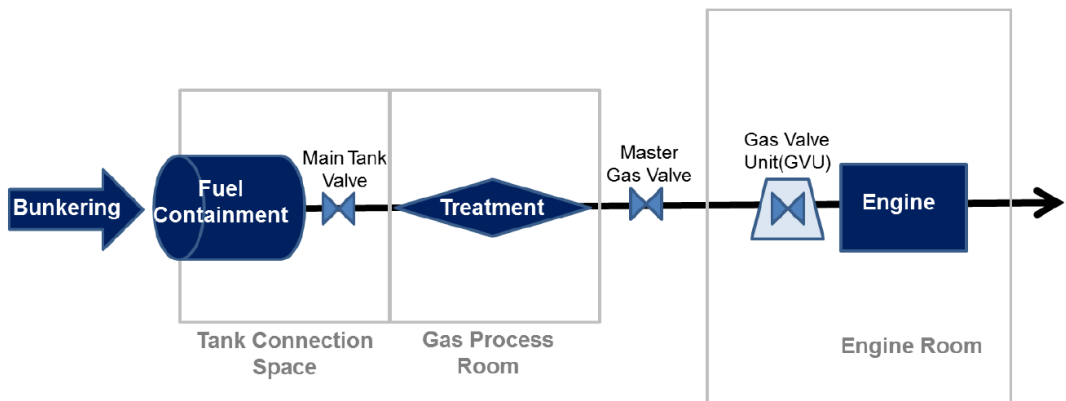


Figure 4-4 Gas supply system diagram

병커링 스테이션은 개방갑판에 설치되어 충분한 자연 통풍이 이루어질 수 있도록 해야 한다. 만약 폐쇄되거나 반만 개방된 장소에 병커링 스테이션이 설치되는 경우에는 위험성평가(Risk assessment)가 실시 되어야 한다. 연결부나 파이프는 LNG 탱크에 도달하기 까지 예상치 못한 가스 누설을 제어할 수 있도록 배치해야 한다. 병커링 프로세스(Bunkering process)가 끝난 후에 병커링 라인(Bunkering line)은 비활성 기체로 채워져서 Gas-free상태를 유지하여야 한다.

4.2.3 가스 컨슈머로의 연료 공급

LNG 탱크에서 가스 컨슈머인 메인 엔진까지 연료가 공급될 때까지 연료 공급 시스템에서 고려되어야 하는 규제를 IGF Code 9. FUEL SUPPLY TO CONSUMERS를 바탕으로 분석하였다.

연료공급시스템은 어떠한 경우에라도 연료 누설을 최소화하고, 운영 및 보수를 위해서 안전하게 접근할 수 있도록 설계되어야 한다. 연료 파이프

시스템(Fuel Piping System)은 누설로 인하여 인명이나 선체에 영향을 미칠 수 없도록 설계되어야 한다. 기관실(Machinery Space) 외부에 위치한 연료관은 외부의 충격으로부터 파이프가 손상되는 일이 없도록 배치되어야 한다.

LNG연료추진 관련 기기가 배치되는 기관실 내에서의 폭발사고 방지를 위해서 IGF Code에서는 두 가지의 기관실 컨셉(Machinery Space Concept)만을 허용한다. 첫 번째는 ‘Gas Safe Machinery Space’ 컨셉이다. 이는 기관실 내에 있는 모든 기기배치에서 어떠한 경우에도 가스 누설로부터 안전하다고 인정되는 컨셉이다. ‘Gas-safe Machinery Space Concept’에서는 연료의 1차 누설이 기관실로 유입될 수 없다. 두 번째는 ‘ESD-protected Machinery Space’ 컨셉이다. 이는 평소에는 비위험구역(Non-Hazardous Area)으로 여겨지나, 예측하지 못한 사고가 발생할 경우에는 위험구역(Hazardous Area)으로 변할 가능성이 있는 공간 컨셉을 의미한다. ‘ESD protected Machinery space’에서는 연료의 1차누설이 기관실로 유입될 수 있으며, 최악의 누설 발생시에도 잘 대처 할 수 있도록 통풍시스템을 설계 해야 한다. ‘ESD protected Machinery space’는 가스탐지기(Gas Detector), 섷오프 밸브(Shut Off Valve), 리던던시(Redundancy), 효율적인 통풍장치(Efficient Ventilation) 등에 의해 제어되고 통제되어야 한다.

‘Gas-safe Machinery space’에서는 모든 연료 파이프 라인이 이중관(Double Pipe)혹은 통풍관(Ventilated Pipe or Duct)으로 둘러싸인 파이프형태로 구성 되어야 한다. 이중관을 적용할 경우 내부 파이프(Inner Pipe)와 외부 파이프(Outer Pipe)사이에는 불활성가스가 공급되어야 하며, 이는 내부 파이프 내압보다 높아야 한다. 1차 내부 파이프에서 누설발생시 불활성 가스의 압력이 하강하여 알람을 감지할 수 있다. 내부 파이프 주위를 통풍관이 둘러싸고 있는 컨셉의 경우, 시간당 환기 횟수(Air Change per Hour, ACH)가 30회 이상이 되도록 통풍 용량을 설계 해야 하며, 가스 누설이 감지되었을 경우 자동으로 질소를 채워 ACH가 10까지 감소될 수 있다. 통풍을 위한 팬은 폭발로부터 안전해야 하며, 통풍 출구는 어떠한 경우에도 연소

가능한 연료 혼합물이 유입될 수 없도록 설계 되어 한다. 연료관과 연료분사밸브(Gas Injection Valve) 사이의 연결부는 통풍관(Duct)으로 둘러 쌓여 있어야 하며, 이는 연료분사밸브 및 실린더커버의 교체 및 점검에 불편을 주지 않도록 설계되어야 한다.

‘ESD-protected machinery space’에서는 연료공급시스템 내의 압력이 10 barg(1.0 MPa)를 초과하지 않으며 연료공급파이프의 설계 압력 또한 10 barg로 설정한다. ‘ESD protected machinery space’는 통풍설비 설계 시 ACH를 30까지 설계 하는 것이 원칙이나, 기관실내에 탐지기가 있을 경우 15 ACH를 유지하다가 가스가 감지 되었을 경우 ACH를 30까지 올리도록 설계할 수 있다.

4.2.4 화재안정성 확보

선박의 화재 안정성 확보를 위해 고려되어야 하는 사항은 IGF Code 11 FIRE SAFETY에 기재되어 있으며 본 논문에서는 탱크 및 관련기기 최적 배치를 위한 관점에서 분석하였다.

연료공급에 관련한 모든 기기들은 화재 안전에 있어서 ‘Machinery Space of Category A’로 분류하여 관리한다. 펌프, 컴프레서, 열교환기, 기화장치(Vaporizer), 압력용기 등이 포함된다.

거주구역, 제어실, 탈출구, 기관실, 개방갑판에 설치된 탱크와 마주한 부분은 A-60 Class로 분류되어 관리된다. 이는 브릿지 (Navigation Bridge) 하부 갑판 까지만 적용되며 Navigation Bridge Window를 포함한 브릿지 상부는 A-0로 분류되어 관리된다. 연료탱크는 IMDG Code(International Maritime Dangerous Goods Code)에 따라 분류되어 관리된다. 병커링 스테이션은 A-60으로 분류되는 구역과, 거주구역, Category A로 분류된 기관실, 제어실 등과 분리되어 배치 되어야 한다.

그 외에 연료가 남아 있는 모든 파이프 및 장비는 Category A로 분류된 기관실과 분리되어야 하는데 A-60 Class에 적용되는 900 mm 이상 두께 단열재로 코퍼댐(Cofferdam)을 구성한다. 비교적 안전한 지대(Low Fire Risk)로 간주되는 구역으로부터 연결된 연료 파이프는 SOLAS regulation II-2/9에 의거하여 Category A로 분류된다. 타입 C 독립형 탱크의 경우에는 연료저장공간(Fuel Storage Hold Space)을 Cofferdam으로 간주한다.

‘ESD protected Machinery Space’의 경우 단일 경계에 의해서 분리되는데 그 경계는 A-60 Class로 분류된다.

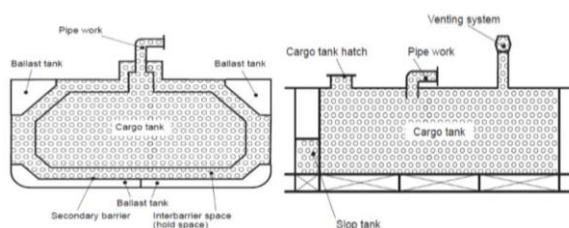
4.2.5 폭발 방지

IGF Code에서는 가스연료에 노출될 가능성에 따라 분류하여 ‘위험구역(Hazardous area zone)’을 정의하였다. 이는 **Table 4-5**과 같이 정리할 수 있다. 분류된 ‘위험구역’ 등급에 따라 설치가능 한 기기 및 안전 대책이 다르게 요구되므로 선박의 안정성 및 경제성을 위해서는 ‘위험구역’을 최소화한 탱크 및 기기 최적 배치가 요구된다. ‘위험구역’에는 운영상 필수적인 전기기기를 제외하고는 전기기기의 배치를 피해야 한다. 자세한 내용은 IEC standard 60092-502, part 4.4: Tankers carrying flammable liquefied gases as applicable, IEC 60092-502:1999 Electrical Installations in Ships – Tankers – Special Features and IEC 60079-10-1:2008 Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres, according to the area classification. 에 기술되어 있다.

Table 4-5 Definition of hazardous area zone

Hazardous area zone 0

Zone 0 : an area in which an explosive gas atmosphere or a flammable gas or vapor is present continuously or is present for long period. This zone includes, but is not limited to the interiors of fuel tanks, pipes and equipment containing fuel.



[35]

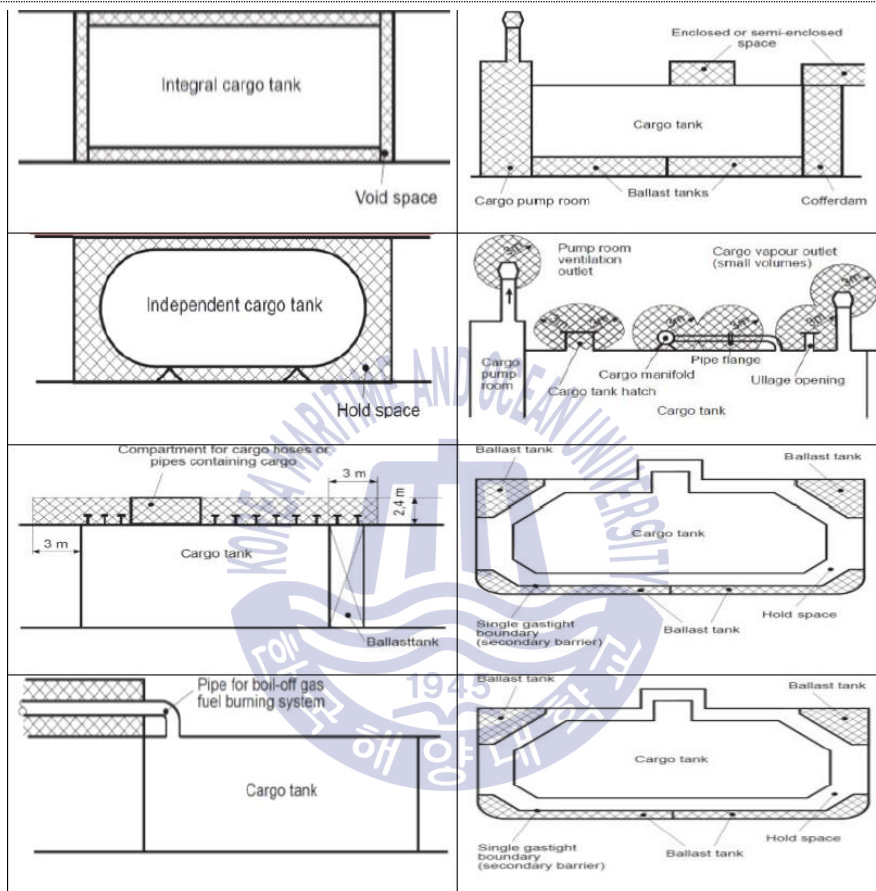
Hazardous area zone 1

Zone 1 : an area in which an explosive gas atmosphere or a flammable gas or vapor is likely to occur in normal operation. This zone includes, but is not limited to:

- .1 tank connection spaces, fuel storage hold spaces²³ and interbarrier spaces;
 - .2 fuel preparation room arranged with ventilation according to 13.6;
 - .3 areas on open deck, or semi-enclosed spaces on deck, within 3 m of any fuel tank outlet, gas or vapour outlet, bunker manifold valve, other fuel valve, fuel pipe flange, fuel preparation room ventilation outlets and fuel tank openings for pressure release provided to permit the flow of small volumes of gas or vapour mixtures caused by thermal variation;
 - .4 areas on open deck or semi-enclosed spaces on deck, within 1.5 m of fuel preparation room entrances, fuel preparation room ventilation inlets and other openings into zone 1 spaces;
 - .5 areas on the open deck within spillage coamings surrounding gas bunker manifold valves and 3 m beyond these, up to a height of 2.4 m above the deck;
 - .6 enclosed or semi-enclosed spaces in which pipes containing fuel are located, e.g. ducts around fuel pipes, semi-enclosed bunkering stations;
 - .7 the ESD-protected machinery space is considered a non-hazardous area during normal operation, but will require equipment required to operate following detection of gas leakage to be certified as suitable for zone 1;
 - .8 a space protected by an airlock is considered as non-hazardous area during normal
-

operation, but will require equipment required to operate following loss of differential pressure between the protected space and the hazardous area to be certified as suitable for zone 1; and

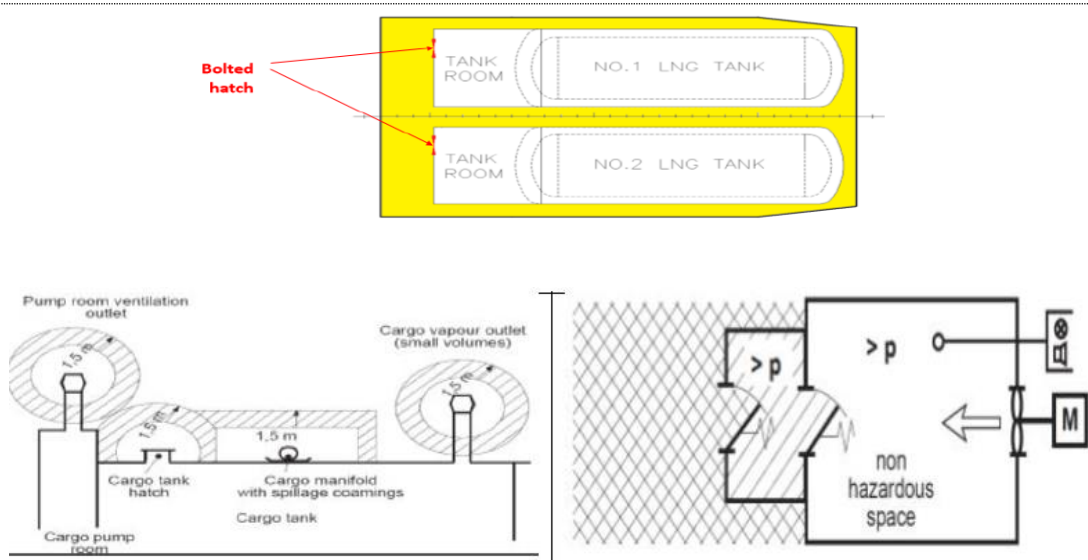
.9 except for type C tanks, an area within 2.4 m of the outer surface of a fuel containment system where such surface is exposed to the weather.



(Kokarakis, July, 2015) [35]

Hazardous area zone 2

Zone 2 : an area in which an explosive gas atmosphere or a flammable gas or vapor is not likely to occur in normal operation, if it does occur, is likely to do so only infrequently and will exist for a short period only.



(Kokarakis, July, 2015) [35]

Non-Hazardous area zone

an area in which an explosive gas atmosphere is not expected to be present in quantities such as to require special precautions for the construction, installation and use of equipment.

4.2.6 화물의 적양하 시 홀수(Draft)

벌크선 혹은 탱커선의 경우 화물의 하역 전후의 홀수 차이가 크게 난다. 부두에 접안 하여 양하역 중에 연료인 LNG를 병커링 한다고 가정했을 때 선박의 홀수 차이가 클 경우, 병커링 장비인 극저온 호스(Cryogenic Hose)의 길이가 짧아 탱크까지 도달하지 못할 가능성이 있다. 아직 병커링에 대한 개념이 명확히 잡혀 있지 않은 이 시점에서는 항만에서는 효율적인 병커링 장비를 갖춰야 할 뿐만 아니라, 선박 초기 설계 시에 이를 미리 염두에 두어 발라스트 시스템(Ballast System)이나 탱크 위치를 조정할 필요성이 있다.

4.3 50k LNG 연료추진 벌크선의 탱크 최적 배치

4.3.1 LNG 탱크 배치

LNG를 연료로 사용하는 선박의 선박 설계 및 각종 기기 배치에 관한 사항은 IGF Code Part A-1 5.SHIP DESIGN AND ARRANGEMENT에 기재되어 있다. 본 논문에서는 IGF Code에 따라 LNG 연료 탱크 배치 시 고려해야 하는 점을 고찰하였다.

물리적 충격이나, 충돌 및 좌초로 인해 LNG 탱크의 손상을 최소화하도록 배치해야 한다. **Figure 4-5**과 같이 여름철 만재흘수선(Summer Load Line Draught) 기준으로 선측에서 중심선 쪽으로 거리가 최소 거리 $B / 5$ 또는 11.5 m 중 작은 쪽 이상으로 여유를 두고 탱크를 배치 해야 한다. B는 최대구획 만재흘수선 또는 그 하부에서의 최대 형폭을 의미한다. 각 연료 탱크의 경계는 탱크 밸브를 포함한 탱크 구조의 가장 바깥 쪽 종단, 횡단 및 수직 경계로 취한다. 독립형 탱크의 경우 보호거리는 탱크의 일차방벽까지의 거리로 측정되며, 멤브레인 탱크의 경우 탱크단열재를 둘러싼 격벽까지의 거리를 측정한다. 선종 및 선박의 크기에 따라 선체외판과 Aft Terminal로부터 연료탱크까지의 최소 안전거리를 지정하고 **Table 4-6**와 같다. 탱크 최하부 경계선은 **Figure 4-6**와 같이 선박 하부 외판의 내측 선에서 $B/15$ 혹은 2.0 m 중 작은 수치 이상의 거리를 두어야 한다. 외판으로부터 탱크의 최고거리를 구하는 방법은 이외에도 SOLAS II-1 7-1,7-2에 분류된 선체 손상 가능성 인자(Factor)를 이용하여 구할 수 있는데 방법은 IGF Code 5.3.4에 기술되어 있다.

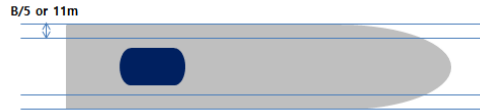


Figure 4-5 Minimum distance from ship side for LNG tank arrangement



Figure 4-6 Minimum distance from bottom shell for LNG tank arrangement

Table 4-6 Minimum distance from shell plating or aft terminal for LNG tank arrangement

여객선		B/10 (0.8이상)
화물선	$V_C \leq 1,000 \text{ m}^3$	0.8 m
	$1,000 \text{ m}^3 < V_C < 5,000 \text{ m}^3$	$0.75 + V_C \times \frac{0.2}{2,000} \text{ m}$
	$5,000 \text{ m}^3 < V_C < 30,000 \text{ m}^3$	$0.8 + V_C \times \frac{1}{25,000} \text{ m}$
	$30,000 \text{ m}^3 \leq V_C$	2 m

연료탱크가 선내에 배치될 경우 인접한 선내 구획에 대해 Gas-Tight 되도록 설계 되어야 한다. 탱크 연결부(Tank Connection) 및 각종 피팅 및 플랜지, 탱크 밸브 등이 개방갑판에 배치되지 않을 경우에는 Gas-Tight한 공간을 설계 해야 하며 탱크 손상 시 누설된 LNG를 안전하게 보관할 수 있는 공간이어야 하고 연료유 시스템에서 누출이 발생할 경우, 가스가 개방갑판으로 방출 되도록 설계 해야 한다. LNG 탱크의 파이프 연결부는 탱크의 가장 최상단에 위치하여야 하는데, 타입 C 독립형 탱크의 경우 이 규정에서 제외된다. 탱크

연결부(Tank Connection Space)를 구성하는 격벽은 최악의 누설 상황에 대비하여 압력 및 통풍(Venting) 장비를 설치하고, 극저온 재료를 사용하여 설계한다.

탱크가 개방갑판에 배치 될 경우, 탱크 연결시스템(Tank Connection System)에서 극저온 유체가 누설될 가능성을 대비하여 드립 트레이를 설치하여 선체를 보호 해야 한다. 이때 드립 트레이 재질은 대기압에서 LNG를 보관할 수 있도록 설계 해야 한다.

탱크 주변에는 건 공기가 공급될 수 있도록 해야 한다. 타입 C 독립형 탱크 이외의 탱크의 경우에는 부분적인 혹은 전체적인 이중장벽이 요구되는데 이때 불활성기체발생기(Inert Gas Generator, IGG)에서 생산되거나 저장탱크에 저장된 건 공기를 공급 해야 한다. 이때 건 공기 저장용량은 최소 30일을 보관할 수 있도록 설계한다. 타입 C 독립형 탱크의 경우에도 주변에 충분한 건 공기를 공급해주어야 하는데 이는 탱크표면에 공기중의 수분이 응결 및 결빙되는 것을 방지하기 위함이다.

연료의 누출사고가 발생하여도 비상집결장소(Muster Station), 비상구, 인명구조 설비 등 접근성에는 영향을 미치지 않도록 설계 해야 한다.

한 개의 추진엔진을 사용하는 경우, 타입 C 독립형 탱크를 제외한 모든 탱크사양에서는 연료공급의 차선책(Redundancy) 확보를 위해 반드시 탱크를 2개 이상 나누어서 설치 해야 한다. 타입 C 독립형 탱크에 한하여, 탱크에 별개의 2개 이상의 탱크 연결부(Tank Connection Space)가 구성되는 조건으로 단일 탱크를 허용한다.

4.3.2 부피 효율성과 설치 공간

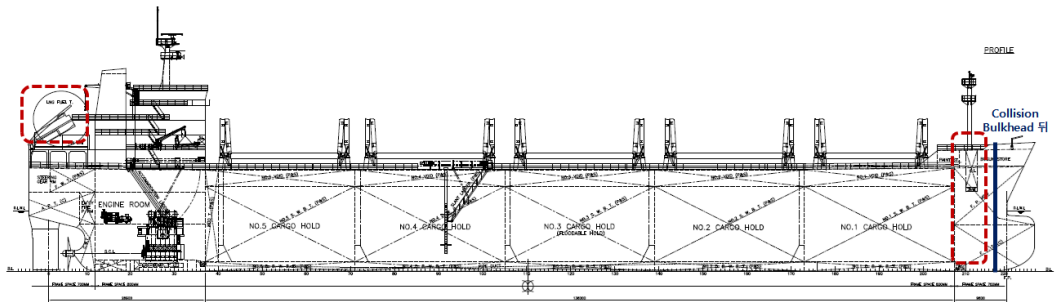


Figure 4-7 General arrangement of target ship (50,000 dwt Bulk Carrier)

벌크선의 경우, 갑판 상부는 해치커버로 덮여있고 선체 대부분이 화물창으로 활용되기 때문에 LNG 연료탱크를 배치할 수 있는 공간이 한정적이다. 타겟 선박인 50,000 DWT 벌크선의 표준 도면에서는 **Figure 4-7**과 같이 거주구역 뒤 편의 선미 부 공간을 이용하거나 선수의 충돌 격벽(Collision Bulkhead) 뒤 빈 공간(Void)에 탱크를 배치할 수 있다. 시멘트 운반선인 ‘MV Greenland’에서 선수의 빈 공간에 실린더형 탱크를 수직으로 배치한 사례가 있다. 선수에 탱크를 배치할 경우에는 항해 가시성을 고려하여야 한다.

본 논문의 타겟 선박은 LOA가 약 190 m이다. 따라서 LNG 탱크를 선수에 배치할 경우 가스 컨슈머인 가스 엔진까지 이어지는 공급 라인(Supply Line)이 약 150 m이상 길어지게 된다. IGF Code에서는 연료 공급 파이프에 대해 이중관 또는 덕트 파이프를 요하며 통풍시스템 및 엄격한 감지, 제어시스템을 요하기 때문에 선수에 탱크를 배치하여 위험구역을 확대하는 것은 경제적으로나 안정성 측면에서 바람직하지 않다고 결론지었으며 LNG 연료탱크를 거주구역 뒤 선미부에 횡방향으로 두는 것을 검토하였다. 탱크를 횡방향으로 배치 시 종방향으로 배치 했을 경우보다 선박 좌우동요로 인한 슬로싱 영향을 많이 받게 됨으로 이는 탱크 설계 시 반영되어야 한다.

탱크는 IGF Code에 따라 선체 외판으로부터 최소거리를 두고 배치 되어야 한다. 타겟 선박의 B(Breadth, molded)는 32.26 m이다. IGF Code에 따르면 여름철 만재 홀수선 기준으로 선측에서 중심 쪽으로 B/5인 6.452 m이 떨어진 곳에 탱크가 배치 되어야 한다. 그리고 어떠한 경우에도 선측에서 2m이상 거리에 위치해야 한다. 이를 도식화하면 **Figure 4-8**과 같다.

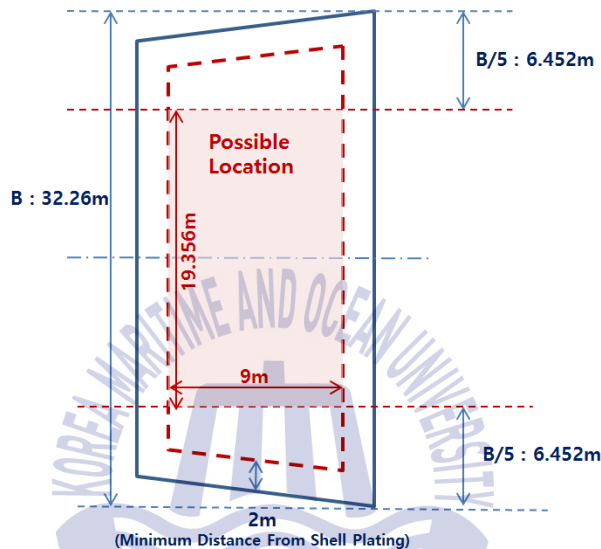


Figure 4-8 Possible LNG tank location (Considering minimum distance)

Figure 4-8에서 탱크배치가 가능한 구역에서 실린더형 탱크와 격자형 탱크의 공간효율성을 비교한 결과는 **Table 4-7**와 같다. 높이조건을 6m로 같게 하여 비교하였을 때, 실린더형 탱크 중 접시구형 헤드(Torispherical Head) 형상을 적용했을 때, $16.4\text{ m} + \alpha(\text{헤드 길이})$ 로 가장 긴 길이의 형상이었으며 격자형 탱크의 경우는 폭을 최대로 하였을 경우에 최소 9.2 m까지 탱크 길이를 줄일 수 있었다. 무게중심을 낮추기 위한 목적으로 길이를 최대길이인 19 m로 같게 하여 비교하였을 때 역시 접시구형 헤드 (Torispherical Head) 형상의 실린더형 탱크가 5.62 m 의 가장 큰 높이를 요구하였으며 격자형 탱크의 경우 **Figure 4-9**과 같이 최소 3.0 m까지 높이를 줄일 수 있었다. 각 탱크 별 공간효율성을 비교하였을 때, 격자형 탱크가

실린더형 탱크에 비해 우세하였으며, 실린더형 탱크는 헤드 형상에 따라 반구형(Hemispherical) > 타원체형(Elipsoidal) > 접시구형(Torispherical Head) 순으로 높은 공간효율성을 보였다.

Table 4-7 Comparison of space efficiency between cylinder and prismatic type Tanks

Common Condition	Tank Type	Sensitivity Analysis	Result
------------------	-----------	----------------------	--------

Height(Diameter) = 6m Volume : 500m ³	Cylinder Type Tank	Elipsoidal Head	Length to Tan To Tan = 15.7 m
		Torispherical Head	Length to Tan To Tan = 16.4 m
		Hemispherical Head	Length to Tan To Tan = 13.7 m
	Prismatic Type Tank	Width=D(6m)	Length = 13.9 m
		Maximum Breadth=9m	Length=9.2 m
Length=19m Volume : 500m ³	Cylinder Type Tank	Elipsoidal Head	Diameter (Height) = 5.54 m
		Torispherical Head	Diameter (Height) = 5.62 m
		Hemispherical Head	Diameter (Height) = 5.32 m
	Prismatic Type Tank	Width=5.49 m (Average of Cylinder Type Tank Heights)	Height = 4.79 m
		Maximum Width=9m	Height = 3.0 m

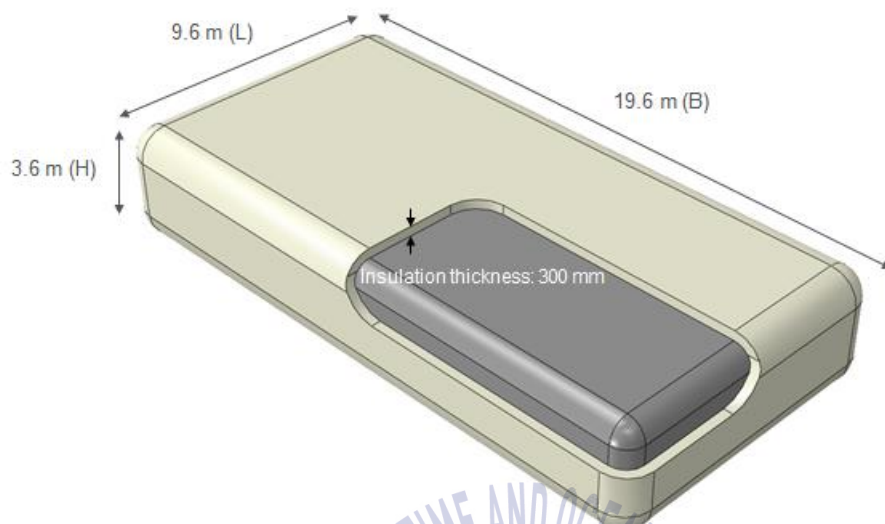
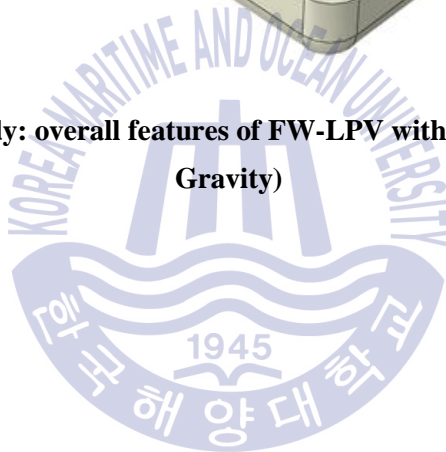


Figure 4-9 Case Study: overall features of FW-LPV with lowest CG (Center of Gravity)



제 5 장 결 론

본 논문에서는 선박 유해 배기가스에 관한 환경규제가 강화됨에 따라 증가할 것으로 예상되는 LNG 연료추진선박의 동향을 분석하고 LNG 연료탱크로 격자형 탱크(LPV)를 중심으로 고찰하였다. 본 논문에서는 50,000 DWT 벌크선을 타겟 선박으로 선정하고 압력용기를 형상에 따라 실린더형 탱크와 격자형 탱크로 나누어 기술적 특성 및 탱크 배치 문제를 비교 검토하고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 실린더형 탱크와 격자형 탱크는 모두 LNG용 압력용기 규정에 의해 설계되어 IMO 타입 C 독립형 탱크의 기술적 특성을 가졌다. 슬로싱에 강하고 별도의 BOG 관리가 필요 없어 LNG 연료 탱크로써 적합하다고 판단된다.
2. 격자형 탱크는 실린더형 탱크를 대체할 수 있었다.
3. 격자형 탱크는 공간효율성이 좋고, 형상을 자유롭게 변경할 수 있다는 점이 LNG 탱크 배치 설계 시 유리하였다.
4. 격자형 탱크는 선내 빈공간의 형상에 따라 탱크제작이 가능하기 때문에 재화용적손실을 최소화하여 선박의 경제성을 높일 수 있었다.
5. 실린더형 탱크는 약 85척 이상의 LNG연료추진선에 이미 적용 되어 성능과 안전성이 검증되었다. 또한 단일탱크가 적용될 경우 격자형 탱크에 비해 생산 경제성이 높고, 탱크 자체도 경량이다.

본 논문의 타겟 선박인 50,000 DWT 벌크선의 경우 선미에 충분한 공간이 확보되어 500 m³ 용량의 실린더형 연료탱크를 배치하는 것이 경제적이라고 판단하였다. 하지만 탱크의 용량이 증가할 경우, 공간효율성이 좋지 않은 실린더형 탱크는 두 개 이상으로 나누어 배치되어야 하기에 격자형 탱크가 경쟁력이 있을 것으로 사료된다. 향후 선종 및 탱크용량에 따른 격자형 탱크의 최적화 연구가 추가로 이루어져야 한다.

제 6 장 참고 문헌

- [1] Lloyd's Register, 2016. *IMO Carriage of Cargoes & Containers Third Session (CCC3)*
- [2] DNV-GL, 2016. *LNG Fuelled Vessels, Ship list-Vessels in operation and vessels on order*
- [3] Lloyd's Register, 2014. *Global Marine Fuel Trends 2030*, London: Lloyd's Register.
- [4] European Commission, 2015. *Study on the Completion of an EU Framework on LNG Fuelled Ships and its Relevant Fuel Provision Infrastructure*
- [5] Danish Maritime Authority, 2012. *North European LNG Infrastructure Project, Trans-European Transport Network*.
- [6] ABS Houston, TX, 2013. *Design and Certification of Type C Independent Tanks for Gas Fuelled Ship*, s.l.: ABS.
- [7] NAGATA, Y., TANGOUE, A., KIDA, T. & KAWAI, T., 2015. IHI-SPB Tank for LNG-Fueled Ship. s.l., Japan Marine United Corporation, p. 17_21.
- [8] DNV-GL, 2016. *Global Sulphur Cap 2020*
- [9] ClassNK, 2015. Technical Information. *TEC-1060*, 22 12.
- [10] 김수엽, 이오춘, 반영길, 2015. 수도권 컨테이너화물의 대중국 수출입 경로 분석: 한국해양수산개발원.
- [11] Ship & Bunker News, 2015. *Scientist Calls for Singapore ECA*.
- [12] Haines, M., 2015. *Emission Controlled Areas : New Regulations For 2015*. CLYDE&CO.

- [13] EIA, 2015. *Korea Energy Data and Analysis*
- [14] OECD, 2016. *Reducing Sulphur Emissions from Ships*
- [15] Sea News, 2016. *www.seanews.com*. [Online]
Available at: <http://www.seanews.com.tr/news/139158/Maritime-Traffic-Increased-Up-Fourfold-in-Two-Decades.html>
- [16] Lloyd's Register, 2012. *LNG-fuelled deep sea shipping*
- [17] Aronietis, R., 2016. Forecasting port-level demand for LNG as a ship fuel : the case of the port of Antwerp. *Journal of Shipping and Trade*.
- [18] Malcolmoliver, 2016. *Malcolm Oliver's Cruise Blog*. [Online]
Available at: <https://malcolmoliver.wordpress.com/2015/06/25/so-whats-an-lng-cruise-ship/>
- [19] Wursig, G.-M., 2013. *LNG fuel tank - benefits and challenges*, DNV-GL.
- [20] Great Lakes Maritime Research Institute, 2012. *Norwegian Maritime Use of LNG*
- [21] SANMAR, 2014. *The world's First LNG Fuelled Tugboats*, Istanbul: SMM
- [22] Terntank, 2016. [Online]
Available at: <http://www.terntank.com/news/video-from-launching-of-mt-ternsund/>
- [23] Harperscheidt, J., 2015. *Retrofit of High-Pressure Fuel Gas Supply System for ME-GI on MV 'Rasheeda'*, s.l.: TGE, Gastech Conference Singapore.
- [24] IHI Engineering, 2015. IHI-SPB Tank for LNG-Fueled Ship. IHI Engineering Review Vol.47 NO.2, p. 18.
- [25] LATTICE TECHNOLOGY, 2016. Lattice Pressure Vessel(LPV) Brochure.
- [26] Clarkson Research Services, Spring 2015. *Shipping Review and Outlook*, London
- [27] Hyundai Heavy Industries, 2016. *Hyundai Heavy Industries, the Provider of Total*

Solution for Eco-friendly Ships, s.l.: Hyundai Heavy Industries

- [28] CHANG, D., 2015. *A scalable, prismatic pressure vessel with applications for the LNG infrastructure*, Kormarine Conference 2015.
- [29] Junkeon Ahn, Younseok Choi, Daejun Chang*, Hyun Chung, Choonghee Jo, and Pål G. Bergan, 2016, *Design of a prismatic pressure vessel with internal X-beam structures for a ship applicatio*, *SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES*.
- [30] Junkeon Ahn, Hwalong You, Jeongyeon Seo, Choonghee Jo, Younghee Cho, Yeelyong Noh, Daejun Chang*, Hyun Chung, and Pål G. Bergan, *Strength Assessment of Prismatic Pressure Vessel having Plated Structures based on Numerical and Experimental Approaches*.
- [31] Wartsila, 2015. Wartsila Technical Journal 02
- [32] Akiyama, 1980. s.l.: International Cryogenic Engineering Conference.
- [33] SIGTTO, 2012. *Guidance for the Prevention of Rollover in LNG Ships*, Bermuda: SIGTTO
- [34] TURK LOYDU, 2013. *Chapter 21 – Navigation Bridge Visibility, Bridge*
- [35] Kokarakis, J., July, 2015. *Standards and Guidelines for Natural Gas Fuelled Ship Project*, s.l.: University of Strathclyde.
- [36] DNV-GL, 2016. China Introduces Sulphur Requirements For Marine Fuels. TECHNICAL AND REGULATORY NEWS No. 03/2016.
- [37] IMO, 2015, International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF code)
- [38] Crowley, 2016. [Online]
Available at: www.lngworldnew.com
- [39] Rolls Royce, 2016. [Online]

Available at: www.rolls-royce.com

[40] TOTE, 2016. *TOTE*. [Online]

Available at: www.toteinc.com

[41] LNG World News, 2016 [Online]

Available at: www.lngworldnew.com

[42] Ferus Smit, 2016. [Online]

Available at: www.ferus-smit.nl

[43] NSK Ship Design, 2016. [Online]

Available at: www.nskshipdesign.com/

[44] Euro Tug Owners, 2016. [Online]

Available at: <http://www.eurotugowners.com/>

[45] UECC, 2016. [Online]

Available at: www.uecc.com

[46] Desgagnes, 2016. [Online]

Available at: www.groupe-desgagnes.com

[47] World Maritime News, 2016. [Online]

